



Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ingeniería

Diseño centrado en el usuario. Caso de estudio: Plataforma de apoyo a la valoración de la capacidad muscular de la mano

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Presenta:

Ing. Javier Galvez Castillo

Comité Tutorial:

Dr. Otniel Portillo Rodríguez

Dr. Oscar Osvaldo Sandoval González

Dr. Marcelo Romero Huertas

Toluca, México, marzo de 2021

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	4
LISTADO DE ACRÓNIMOS	6
RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
OBJETIVO GENERAL	13
META DE INGENIERÍA	13
JUSTIFICACIÓN.....	13
CONTENIDO DE LA TESIS	14
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	15
1.1 Metodología de Cascada.....	16
1.2 Metodología de Espiral.....	17
1.3 Metodologías Ágiles.....	18
CAPITULO II: METODOLOGÍA UCD	21
2.1 Análisis de necesidades	22
2.2 Análisis de usuario y de tareas	22
2.3. Análisis funcional	27
2.4. Análisis de requerimientos	27
2.5. Proponer criterios de usabilidad	27
2.6 Diseño	28
2.7 Prototipado	29
2.8 Evaluación	29
2.9 Implementación	30
CAPITULO III: ESTADO DEL ARTE: PLATAFORMA.....	32
CAPITULO IV: PLATAFORMA DE APOYO PARA LA VALORACIÓN DE LA CAPACIDAD MUSCULAR DE LA MANO	38
4.1. Análisis de Necesidades	38
4.2 Análisis de usuario y de tareas	39
4.3 Análisis funcional	41
4.4 Análisis de requerimientos	42
4.5 Criterios de evaluación.	43
4.6 Primera Iteración	43
4.7 Segunda Iteración	46

4.8 Tercera Iteración	49
4.9 Cuarta Iteración	65
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	83
ANEXOS.....	86
Diagrama eléctrico	86
Planos de Ingeniería.....	87
Ejemplo cuestionario SUS.....	88
Guía de uso rápido	89
Consentimiento Informado	92
REFERENCIAS	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Bloques de la Metodología de Cascada.....	17
Figura 2. Diagrama de metodología de espiral	18
Figura 3. Diagrama de flujo UCD basado en [20].	22
Figura 4. Juego para sistema de Rehabilitación	32
Figura 5. PLEMO en posición horizontal e inclinada.....	33
Figura 6. HandSOME tiene un peso de 0.22 kg.....	34
Figura 7. HEXOSYS 1.4 kg dispositivo portable	34
Figura 8. Interfaz del sistema [15]	35
Figura 9. Prototipo para rehabilitación de mano de Huang and Low 2008.....	35
Figura 10. Dispositivos para rehabilitación [38].....	36
Figura 11. Juego de rehabilitación [41].....	37
Figura 12. Dispositivo para leer sensores [42].....	37
Figura 13. Diagrama de flujo UCD basado en [20].	38
Figura 14. Entrevista con especialistas en rehabilitación Física de la Facultad de Medicina de la UAEM.....	39
Figura 15. Herramientas para medición de fuerza y rehabilitación.	39
Figura 16. Roles de los usuarios para la plataforma	40
Figura 17. Diagrama de flujo para la plataforma	41
Figura 18. Sensor Flexiforce	44
Figura 19. Interfaz gráfica y módulo de comunicación primera iteración	44
Figura 20. Pinzas de Agarre para la segunda iteración	47
Figura 21. Pruebas para la caracterización del sensor.....	47
Figura 22. Módulo de Comunicación.....	48
Figura 23. Interfaz gráfica Segunda iteración	48
Figura 24. Celda de Carga.....	50
Figura 25. Diagrama interno	51
Figura 26. Celda de carga.....	51
Figura 27. Mango Instrumentado tercera Iteración.....	51
Figura 28. Diagrama de amplificador de Instrumentación	52
Figura 29. Diagrama AD620.....	52
Figura 30. Filtro RC de primer orden.....	53
Figura 31. Trama del Módulo de Comunicación	54
Figura 32. Lectura del Osciloscopio.	54
Figura 33. Módulo de comunicación	55
Figura 34. Diagrama de bloques de la PVCMM.....	55
Figura 35. Icono PVCMM	56
Figura 36. Pantalla Autorización.....	57
Figura 37. Pantalla Setup PVCMM	57
Figura 38. Pantalla accesos directos.....	57
Figura 39. Pantalla Crear Icono en el escritorio.....	58
Figura 40. Resumen de Instalación	58
Figura 41. instalación en proceso	58
Figura 42. instalación Finalizada	59
Figura 43. Pantalla Registro de Evaluador.....	60
Figura 44. Pantalla Inicio de sesión	60
Figura 45. Pantalla Menú	61
Figura 46. pantalla Registro de Pacientes	62

Figura 47. Pantalla Prueba de Fuerza.....	63
Figura 48. Pantalla Análisis de datos	64
Figura 49. Señal con filtro (verde) y Señal sin Filtro (roja).....	64
Figura 50. Diseño del Mango.....	66
Figura 51. Comparación entre propuestas – Deformación Mecánica -.....	66
Figura 52. Comparación entre propuestas realizada por un usuario experto	67
Figura 53. Mecanismo para la calibración del mango instrumentado.....	67
Figura 54. Respuesta del sensor y una linealización.....	68
Figura 55. Respuesta del sensor y tres linealizaciones.....	69
Figura 56. Icono de ayuda.....	73
Figura 57. Layout para la prueba.	74
Figura 58. Anfitrión dando bienvenida a usuario.....	77
Figura 59. Facilitador y usuario en la prueba.....	77
Figura 60. Pruebas de Usabilidad.....	79
Figura 61. Formato de Cuestionario SUS	80

LISTADO DE ACRÓNIMOS

ADC:	Analog to Digital Converter / Convertidor Analógico Digital
AR:	Augmented Reality / Realidad Aumentada
ASHT:	American Society of Hand Therapists / Asociación Americana de Terapeutas de la Mano
CA:	Cuerpo Académico
CDC:	Communication Device Class / Clase de Dispositivo de Comunicación
CMRR:	Common Mode Rejection Ratio / Factor de Rechazo al Modo Común
CNC:	Computer Numerical Control / Control Numérico por Computador
CREE:	Centro de Rehabilitación y Educación Especial
DSDM:	Dynamic Systems Development Methods
DSyC:	Dinámica de Sistemas y Control
FDA:	Food and Drug Administration / Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos
FI:	Facultad de Ingeniería
FIR:	Finite Impulse Response / Respuesta Finita al Impulso
HF:	Human Factor / Factor Humano
HFE:	Human Factor Engineering / Ingeniería del Factor Humano
HMI:	Human Machine Interface / Interfaz Hombre Maquina
OIT:	Organización Internacional del Trabajo
PVCMM:	Plataforma para la Valoración de la Capacidad Muscular de la Mano
RGS:	Rehabilitation Game systems / Sistemas de Juego de Rehabilitación
ROM:	Range of Motion / Rangos de Movimiento
SUS:	System Usability Scale
UCD:	User Centered Design / Diseño Centrado en el Usuario
USB:	Universal Serial Bus /Bus Serial Universal
VR:	Virtual Reality / Realidad Virtual
XP:	Extreme programming

AGRADECIMIENTOS

[Redacted text block]

RESUMEN

Esta tesis presenta el desarrollo de una plataforma para la medición de la fuerza de la mano, que ayuda a profesionales de la salud a obtener la información necesaria para valorar la capacidad muscular de la mano de sus pacientes, permitiendo tomar decisiones sobre el desarrollo de sus terapias, en base a datos cuantitativos que no dependen directamente de la experiencia del evaluador.

Con la finalidad de conocer sus actividades y necesidades, se realizaron entrevistas a médicos y terapeutas del Centro de Rehabilitación y Educación Especial del Estado de México (CREE). De éstas, surgió la necesidad de desarrollar una plataforma para la valoración de la capacidad muscular de la mano, la cual principalmente tiene la función de medir la fuerza de agarre de la mano [1] [2], ya que, dicha fuerza se puede usar como un indicador de la salud general de la mano de un paciente [3]. La mayoría de las herramientas usadas en CREE no permiten medir dicha fuerza en forma cuantitativa, por lo que las valoraciones recaen en la experiencia que tiene el evaluador.

Para llevar a cabo totalmente la valoración de la capacidad muscular de la mano; los parámetros necesarios a obtener son: el índice de fatiga, el coeficiente de variación, la fuerza máxima de agarre, fuerza promedio y los rangos de movilidad de las articulaciones en las que el evaluador esté interesado en valorar. Estos últimos, son medidos manualmente por el evaluador ya que la plataforma no los mide.

En la primera etapa del desarrollo de esta tesis, fue clave definir la metodología que debíamos seguir para el diseño de la plataforma. Tomando en consideración que la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA), recomienda incluir al usuario en las primeras etapas de diseño en aras de alcanzar un mayor grado de usabilidad minimizando los errores de diseño e interacción que pudieran existir [4], se concluyó que la metodología *Diseño Centrado en el Usuario* (UCD por sus siglas en inglés) era la más apropiada.

Aprovechando las recomendaciones del personal de salud y siguiendo la metodología UCD, se realizó una primera propuesta, la cual consistía en un arreglo de cinco sensores Flexiforce distribuidos en una pelota flexible acoplados a un juego recreado en una computadora. El prototipo resultó no ser eficaz, los sensores no eran adecuados para la aplicación y el juego presentaba errores de coherencia visual y espacial [4] [5] [6].

En una segunda iteración de la UCD, se cambiaron los sensores Flexiforce por sensores de efecto hall, se modificó el mecanismo para la medición de la fuerza. Sin embargo, el sistema resultó ser más complejo, ya que requería de conectores y cables para cada sensor además de las conexiones para la alimentación y la comunicación con la computadora, lo que implicaba mantenimiento y durante las pruebas la plataforma presentaba problemas para completar las tareas.

Se realizaron dos iteraciones más, las cuales llevaron a un prototipo final, el cual consiste en un mango instrumentado que contiene un arreglo de cuatro celdas extensiométricas, cuyas señales fueron acondicionadas y caracterizadas para lograr una medición de fuerza máxima de 38 kg, una resolución de 9.8 gf. Cuando la plataforma fue comparada con un dinamómetro comercial, se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de $R^2=0.9993$

entre las fuerzas medidas por ambos dispositivos. La señal de fuerza es muestreada a 100 Hz. Su interfaz de usuario se evaluó según los criterios de usabilidad y las heurísticas de Nielsen [7] [8]. Dicha evaluación fue realizada por personal de salud, quienes pudieron realizar la valoración de la capacidad muscular de la mano de un paciente. Los resultados de la evaluación arrojaron una escala de usabilidad del sistema (SUS por sus siglas en inglés) de 85.5 %. Con lo cual se concluye que se tiene una plataforma que puede medir la fuerza de agarre con una exactitud comparada con un dinamómetro comercial, y que los parámetros estimados necesarios para medir la capacidad muscular de la mano pueden ser obtenidos a través de la interacción de la interfaz gráfica de la plataforma por parte del personal de salud.

INTRODUCCIÓN

En México, la última Encuesta Nacional de la Dinámica Demográfica (ENADID) 2018, arrojó que en el país residen 115.7 millones de personas mayores de 5 años de las cuales el 6.7% presentan alguna discapacidad, de ellos, el 18% tienen dificultad o no pueden mover las manos o brazos, lo que repercute en la calidad de vida de las personas al no poder realizar actividades básicas de la vida cotidiana. Según la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la población con discapacidad experimenta mayores tasas de desempleo e inactividad económica en comparación con las personas sin discapacidad [9].

Las actividades de la vida diaria requieren el uso de los músculos de la mano, como lo son: abrir una puerta, vestirse, comer, asearse, etc. Aunado a que la fuerza de agarre puede ser usada para estimar la funcionalidad de la mano, así como el estado de salud presente y futuro de pacientes, especialmente entre las personas mayores [10] [11] [3], evitando lesiones o ayudando en la rehabilitación.

Por otro lado, el avance tecnológico ha permitido crear dispositivos cada vez más potentes y completos. Por ejemplo, los teléfonos celulares, dispositivos que originalmente solo contaban con la capacidad para comunicarse. El día de hoy son capaces de tomar video, fotos, reproducir música, editar archivos de texto, mensajería, videoconferencias, incluso generar una ruta optimizada para llegar a nuestro destino gracias al GPS, por mencionar algunas. Dichas capacidades son de gran ayuda, sin embargo, entre más funciones, aumentan los niveles de riesgo de uso indebido impactando en la usabilidad de las aplicaciones, por lo que es imperativo buscar una manera simple de interactuar con estos dispositivos y eso se puede lograr realizando pruebas y evaluaciones de usabilidad durante su desarrollo [12].

El diseño tradicional de un prototipo que recurre a las especificaciones técnicas como única guía para su diseño dejando en segundo plano al usuario, hace que el prototipo una vez terminado presente problemas de interacción y en consecuencia su objetivo y utilidad se vean mermados. Las fallas de interacción no permiten que el usuario se familiarice eficaz¹ y eficientemente² con la plataforma [4], dejándolo insatisfecho e incluso inseguro de si la tarea para la cual fue construido fue realizada correctamente.

Los problemas de interacción son recurrentes en ingeniería, esto se debe a que la mayoría de los proyectos se basan únicamente en hojas de datos y aspectos puramente técnicos. El hecho de no tomar en cuenta al usuario para complementar el diseño del prototipo causa que no puedan ser implementados o que sean complicados de usar y que el usuario mejor opte por no utilizarlos. Cuantas veces se puede uno encontrar con dispositivos cuya interfaz de usuario es confusa, difícil de usar, y aunque se sabe que el dispositivo realiza la tarea que se necesita, no se puede hacer que realice dicha tarea y es entonces cuando se busca una opción más simple dejando de lado dicho dispositivo.

¹Capacidad de lograr el efecto que se desea o se espera

²Es la capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un objetivo determinado con el mínimo de recursos posibles viable

Algunas de las causas que ocasionan fallas en la interacción son:

- Retroalimentación incorrecta al usuario
- Contradecir las expectativas de los usuarios
- Requerimiento de cálculos complejos
- Inconsistencias entre los formatos de visualización
- Control ilógico o engorroso secuencias
- No tomar en cuenta el factor humano [13].

El factor humano (HF por su acrónimo en inglés) es la disciplina que busca mejorar el desempeño humano en el uso de equipos a través de un diseño de hardware y software que sea compatible con las capacidades cognitivas, auditivas, visuales, motoras, perceptuales, entre otras de los usuarios [6]. Es de vital importancia tomar en cuenta la mayoría de los aspectos que influyen en el desempeño del usuario y en la forma de interactuar con el dispositivo, ya que al incluir el factor humano en etapas tempranas de diseño se pueden detectar y eliminar la mayoría de los problemas, fallas y riesgos potenciales.

El Cuerpo Académico (CA) de Dinámica de Sistemas y Control (DSyC) de la Facultad de Ingeniería (FI) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex) tiene como una de sus líneas de investigación el desarrollo de dispositivos aplicados a la salud: robots médicos, exosqueletos para rehabilitación, sistemas de termoterapias y de medición de equilibrio entre otros. El tema de investigación de esta tesis surge de entrevistas de colaboración entre los investigadores del CA y personal de salud del CREE. Quienes mostraron su interés en el desarrollo de un dispositivo que les ayudará a realizar la valoración de la capacidad muscular de la mano, ya que las herramientas usadas en el centro de rehabilitación no cuentan con un sistema que les permita obtener datos cuantitativos y fiables sobre la capacidad muscular de la mano.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es común encontrar dispositivos que se diseñan sin tomar en cuenta al usuario. Por ejemplo, HandSOME [14], es un dispositivo que ayuda al paciente a mover los dedos de la mano para tareas de agarre. Fue puesto a prueba con pacientes y mostro ser una herramienta muy útil, sin embargo, dado que su peso es de 0.22 kg, no todos los pacientes pudieron endosarlo a su mano, haciéndolo no funcional, por lo que fue necesario someterlo a un rediseño. Otro caso, es el guante instrumentado hecho en [15], el cual obtiene datos sobre la fuerza que se ejerce al sujetar un objeto, sin embargo, su interfaz de usuario no cumplía con criterios de usabilidad, ya que solo presentaba el valor de las lecturas sin cumplir con los criterios de aprendabilidad y memorabilidad.

Acercarse al usuario para que con su ayuda se generen plataformas útiles es de suma importancia. Por ejemplo, en [16], diseñaron juegos para terapia ocupacional, mejor conocidos como *Rehabilitation Game Systems* (RGS por sus siglas en inglés). En el proceso de diseño se grabaron a los pacientes realizando las terapias, los videos analizaron con ayuda de los terapeutas, para que a partir de ellos se generaran RGS que cumplieran con los mismos objetivos en cuanto a la destreza y la movilidad de tal forma que el paciente sea autosuficiente. El resultado es un RGS que no presenta datos cuantitativos

que ayuden a los terapeutas a valorar el grado de discapacidad del paciente y su valoración se basa en la experiencia del evaluador.

Para diseñar una plataforma que impida cometer errores de interacción o reduzca la probabilidad de generarlos, se debe analizar los objetivos que se desean alcanzar, para así poder definir qué tareas nos ayudarán a alcanzar dichos objetivos. Las tareas estarán en función de los escenarios de uso, los cuales ayudan a identificar las posibles causas que lleven al usuario a cometer un error en la interacción con la plataforma y definir qué acciones ayudan al usuario a corregir el error. Por ejemplo, en [17] analizan todas las tareas necesarias que un usuario debe realizar para cumplir el objetivo de medir la cantidad de azúcar en su sangre utilizando un glucómetro. Un desarrollador inexperto supondría que realizar las tareas para cumplir dicho objetivo es simple, ya que supone que usar un glucómetro es fácil y por lo que diseñarlo también lo es. Sin embargo, con dicho estudio queda claro que esto no se puede afirmar.

Otro aspecto muy importante por tomar en cuenta en el diseño de plataformas es su minimalismo. Esto es, que su diseño debería de utilizar el menor número de piezas, de tal forma que sea más fácil y económico darle un mantenimiento preventivo y correctivo. Un ejemplo de un diseño no minimalista es la descrita en [18], que es muy útil para la rehabilitación de mano, sin embargo, su diseño es tan elaborado y son tantas las piezas que lo componen que aumentan la probabilidad de fallas mecánicas.

La FDA es la encargada en Estados Unidos de regular y promover la salud humana tanto en medicamentos y dispositivos médicos, a esta le han sido reportados problemas de diseño causados por dispositivos que no incluyeron el HF y cuyas consecuencias han llegado a ser incluso fatales [4].

La FDA recomienda incluir en la etapa de diseño el HF, por lo tanto, en esta tesis, la UCD se eligió sobre otras metodologías para eliminar en medida de lo posible los accidentes ocasionados por un diseño que no cumpla con criterios de usabilidad e interacción [7] [19] [20]. Esta metodología puede aplicarse a diversas áreas de diseño, y cada decisión que se tomó para el desarrollo del prototipo, fue en función de las necesidades, objetivos, expectativas, y capacidades de los usuarios, permitiendo encontrar la mayoría de los peligros latentes a los que se enfrentan, mediante la planeación de una correcta interacción o permitiendo recuperarse de las situaciones críticas del dispositivo.

Con la UCD es posible diseñar dispositivos sin seguir una metodología que limita las opciones de diseño sólo a la perspectiva del diseñador, dejando de lado las capacidades, necesidades y forma en que el usuario interactúa con los dispositivos. Los errores del diseño tradicional son generados principalmente por la carencia de pruebas o pruebas mal realizadas. Usualmente éstas se realizan en laboratorios con personas que comúnmente no tienen el mismo perfil (sexo, edad, escolaridad, estado civil, habilidades cognitivas, motoras, destreza, etc.) que los usuarios finales. En caso de que las pruebas se realicen con usuarios que cumplan el perfil deseado, es común que ellos sean proactivos, participativos y estén dispuestos a encontrar fallas en el diseño y la interacción de los dispositivos, sin embargo, ese tipo de usuarios son quienes menos generan errores catastróficos (los menos frecuentes) ya que en las pruebas de uso no se presentan dichos errores y por tanto no se puede mitigar su causa [13].

Con la UCD se propone desarrollar una plataforma de medición de la valoración de la capacidad muscular de la mano que principalmente mida la fuerza de agarre de la mano, cubriendo las necesidades concretas del personal de salud y así obtener un mayor grado de usabilidad³, consiguiendo la mayor satisfacción y mejor experiencia de uso posible con el mínimo esfuerzo por parte del personal.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una plataforma que sea capaz de medir cuantitativamente los parámetros necesarios para realizar la valoración de la capacidad muscular de la mano usando una metodología para que la plataforma cumpla con los criterios de usabilidad.

Objetivos particulares:

- Seleccionar el sensor correcto para la medición de la fuerza de agarre de la mano
- Diseñar y construir el soporte de la mano para que sea agarrado por la mano del paciente tomando en cuenta bases ergonómicas de la población objetivo
- Diseñar y construir la electrónica necesaria para adquirir la señal proveniente del sensor de fuerza seleccionado
- Caracterizar la exactitud y repetibilidad de la medición de fuerza de agarre
- Diseñar interfaz de usuario que cumpla con criterios de usabilidad
- Implementar el software para gestionar el histórico de los resultados para su futura comparación basados en archivos de datos de texto plano
- Realizar una prueba de usabilidad de la plataforma

META DE INGENIERÍA

Desarrollar una plataforma que sea capaz de medir cuantitativamente y registrar los siguientes parámetros necesarios para realizar la valoración de la capacidad muscular de la mano: 1) Medición de la fuerza máxima que una persona es capaz de ejercer voluntariamente, 2) Medición de la fuerza máxima durante un lapso de 60 segundos para determinar el índice de fatiga, 3) Obtención del coeficiente de variación y 4) Obtención de la fuerza promedio. El diseño se basará en una metodología para que la plataforma cumpla con los criterios de usabilidad.

JUSTIFICACIÓN

Con el desarrollo de una plataforma que cumpla con criterios de usabilidad se apoyará a médicos y terapeutas a realizar valoraciones de la capacidad muscular de la mano basados en datos cuantitativos que no dependan de la experiencia del evaluador.

Teniendo una plataforma diseñada y que cumpla con criterios de usabilidad como son eficacia, eficiencia y satisfacción del usuario, ésta se podrá usar en diferentes instancias de rehabilitación lo cual permitirá que las valoraciones sean realizadas por personas que no necesariamente tienen años de experiencia para realizar la valoración. Pudiendo, además, tener más personas que puedan atender a más pacientes con problemas en las extremidades superiores.

³Usabilidad es la efectividad, eficiencia y satisfacción con la que un producto permite alcanzar objetivos específicos a usuarios específicos en un contexto de uso específico [55]

CONTENIDO DE LA TESIS

Esta tesis presenta en el Capítulo 1 las diferentes metodologías usadas para el desarrollo de proyectos, plataformas y software que fueron revisadas antes de seleccionar la metodología UCD. En el Capítulo 2 se hace un análisis a fondo sobre la metodología UCD, analizando cada una de sus etapas de diseño.

En el Capítulo 3, en base a la UCD, se analizan diferentes plataformas para rehabilitación que no consideran al usuario en su etapa de diseño, haciendo énfasis en los errores en que incurrir para evitarlos en la plataforma a realizar. En el Capítulo 4 se describe el uso y aplicación de cada una de las etapas de la metodología UCD en el diseño de la plataforma para la valoración de la capacidad muscular de la mano. En el Capítulo 5 se describen detalladamente las pruebas de usabilidad realizadas a la plataforma y los resultados obtenidos de someterla a los criterios de usabilidad y las heurísticas de Nielsen.

Finalmente se exponen las conclusiones del trabajo, el análisis de los objetivos propuestos con los resultados obtenidos y las actividades que se pueden realizar con la experiencia y el conocimiento obtenido durante la realización de la plataforma.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

Para crear productos o servicios de alta calidad es necesario seguir una serie de pasos y actividades durante el ciclo de vida del proyecto [21]. En el desarrollo de un prototipo es común que los diseñadores recurran a las especificaciones técnicas como única guía para su diseño, y sólo se dediquen a cumplir con estos requisitos, ya que existen proyectos que se diseñan pensando exclusivamente en la innovación, complejidad, satisfacción de poder diseñar; dejando la aplicación, objetivo y utilidad del dispositivo en segundo plano lo que provoca que el dispositivo se implemente con fallas o no se implemente por no cumplir con criterios de usabilidad.

La falta de cumplimiento de los criterios de usabilidad no indica que el dispositivo no sirva, indica que el dispositivo no es fácil de usar, o sea, que la interacción no sea la adecuada, aunque cumplan correctamente con su objetivo [7], lo cual se traduce en un diseño con una Interfaz de Usuario (UI Por sus siglas en inglés) que no cumple con los criterios de usabilidad. La UI son todos los medios por los cuales el usuario puede comunicarse con el dispositivo [22] [20] [6] [19].

Una mala interacción con las máquinas puede ocasionar pérdida de dinero, clientes, incumplimiento de los objetivos del cliente o incluso accidentes [19]. Como una respuesta a esta problemática la FDA exhorta a los diseñadores a seguir una metodología que les permita tener una visión global sobre el dispositivo que se va a diseñar, integrando la Ingeniería del factor Humano (HFE por siglas en Inglés) en su proceso de diseño, ya que la Interfaz Hombre Maquina (HMI por siglas en Inglés) es el vínculo que tienen los usuarios para comunicarse con las máquinas y esta es un factor importante que afecta la usabilidad del dispositivo por lo que dicha comunicación debe ser eficiente [6].

La FDA considera algunas reglas de oro que no se deben ignorar para el diseño de un dispositivo como:

- *Expectativas del usuario:* Son todas aquellas ideas que se forma el usuario sobre lo que el dispositivo puede hacer y lo que el usuario espera poder realizar con él.
- *Modelos mentales:* Son todas aquellas las ideas que nos formamos con la experiencia y que nos trasmite el diseño.
- *Capacidades humanas:* Son todas las habilidades y debilidades que como seres humanos tenemos, y que desarrollamos a partir de nuestras experiencias y vivencias.
- *Ambiente de uso:* Son todas las condiciones favorables o desfavorables en las cuales el dispositivo estará trabajando.
- *Ayudas visuales:* Toda la información que ayuda al usuario a entender el proceso y las acciones que se deben tomar. Las ayudas visuales permiten al usuario reconocer las situaciones y acciones que se deben tomar, evitando que el usuario tenga que recordar toda la información ya que según [7], para el ser humano es más fácil reconocer que recordar.

De no tomar en cuenta las reglas de oro en el diseño se pueden presentar consecuencias muy diversas desde aquellas que solo representan una carga mental más fuerte (requiere un poco más concentración y de atención por parte del usuario), algunas otras que hacen

que la interfaz de usuario sea tan compleja que es preferible no usar el dispositivo; hasta aquellas que por su naturaleza e interacción con el usuario pueden provocar un daño físico a las personas e incluso la muerte [6]. El diseño de interfaces eficientes reduce de manera considerable la probabilidad de error y con ello las consecuencias de un *mal diseño* (diseño que no cumple con criterios de usabilidad).

Al buscar formas de reducir estos errores de diseño, resulta necesario seguir algunas pautas, de ahí que se han creado metodologías que permiten al diseñador tener un amplio panorama de los aspectos que hacen que un prototipo pueda ser aceptado rápidamente y no tenga errores en su diseño. Estos errores incluyen errores de uso que comúnmente son causados por el diseño de la UI, aun cuando la funcionalidad en el aspecto técnico del prototipo se cumpla.

Algunas de las metodologías que sirven de pauta para el diseño son conocidas como tradicionales, entre las cuales se encuentran: Cascada, Espiral, DCU y las conocidas como ágiles, gracias a su capacidad de permitir realizar cambios en el diseño de manera muy rápida. En [23] se encontró que existe la posibilidad de un enfoque híbrido entre las metodologías.

Durante el desarrollo de un prototipo es importante definir los alcances y las limitaciones pues, en un diseño siempre se tienen áreas de oportunidad, y éste, debe estar limitado a cumplir con los objetivos propuestos, así como los criterios de usabilidad según hayan sido definidos, ya que buscar un prototipo perfecto que cumpla con todos los requisitos implicaría aumentar el uso de una gran cantidad de recursos económicos, tecnológicos y temporales.

1.1 Metodología de Cascada.

Llamada metodología de cascada por la posición de sus fases, que parecen “caer” de una fase a otra, considerada como metodología tradicional, cuyo proceso generalmente es lento y muy riguroso con la documentación de cada etapa de tal forma que, el inicio de una etapa debe ser únicamente cuando la etapa anterior llegó a su fin [21], está formada por las siguientes fases:

Análisis de requisitos: En esta fase se analizan las necesidades de los usuarios finales para determinar qué objetivos debe cubrir y se genera el documento de especificaciones de diseño.

Diseño del Sistema: Descompone y organiza el sistema en elementos que puedan elaborarse por separado, aprovechando las ventajas del desarrollo en equipo y se genera un documento de diseño donde se almacena todas las especificaciones de cada parte del sistema.

Diseño del Programa: Es la fase en donde se realizan los algoritmos necesarios para el cumplimiento de los requerimientos.

Codificación: Es la fase en donde se implementa el código fuente, haciendo uso de prototipos, así como de pruebas y ensayos para corregir errores.

Pruebas: Los elementos, ya programados, se ensamblan para componer el sistema y se comprueba que funciona correctamente y que cumple con los requisitos.

Verificación: El usuario final ejecuta el sistema para verificar que cumpla con los requisitos.

Mantenimiento: Una de las etapas más críticas es el mantenimiento ya que al utilizarlo como usuario final puede ser que no cumpla con todas nuestras expectativas.

El diagrama de bloques de esta metodología se muestra en la Figura 1.

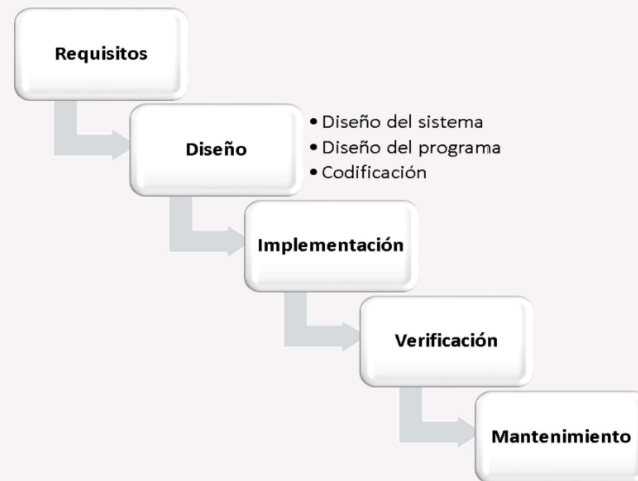


Figura 1. Diagrama de Bloques de la Metodología de Cascada.

La metodología en cascada permite tener una planeación de los pasos que se deben seguir para diseñar, sin embargo, uno de los problemas que presenta es que la interacción del diseño con el usuario se da al final de todo el proceso de diseño, cuando ya se han tomado decisiones de diseño y aunque estas decisiones pueden ser corregidas, a largo plazo implica un gasto innecesario de tiempo, esfuerzo y dinero [21], aunado a que este enfoque implica esperar que las especificaciones iniciales sean correctas y no sufran cambios durante el proceso de diseño [21]. Otro problema es que al tener una única interacción al final del desarrollo del prototipo, el único momento para probar la UI es al final, implicando que los cambios requeridos sean tan costosos y complejos que al final se opta por ignorarlos poniendo en riesgo la interacción del diseño y en consecuencia su funcionalidad.

1.2 Metodología de Espiral

Algunas otras metodologías no esperan tener una iteración con el usuario hasta al final del proceso de diseño, tal es el caso de la metodología de *espiral*, la cual propone un proceso iterativo compuesto por cuatro etapas: el análisis de requerimientos, diseño del sistema, construcción de la solución y evaluación [21].

Por cada vuelta que da la espiral es un nivel más de maduración del producto, al ser iterativo y tener múltiples retroalimentaciones por parte del usuario, este puede proporcionar información sobre el diseño del prototipo y realizar los cambios que sean necesarios. Su diagrama se muestra en la Figura 2, esta metodología es considerada un refinamiento de la de cascada [12], el modelo en espiral tiene la ventaja de combinar el enfoque de desarrollo iterativo de prototipos con los aspectos sistemáticos y controlados

del modelo en cascada pero permite el cambio de las prioridades durante el proceso de diseño y al ser un modelo orientado a la gestión de riesgo, se dice que su éxito radica en que el equipo que lo aplique tenga la experiencia y habilidad para detectar y catalogar correctamente los riesgos. Aun con las iteraciones, la metodología sigue teniendo áreas de mejora como el hecho de que se basa en el diseño bajo especificaciones técnicas, por lo cual es común usarla en conjunto con otras metodologías [23].

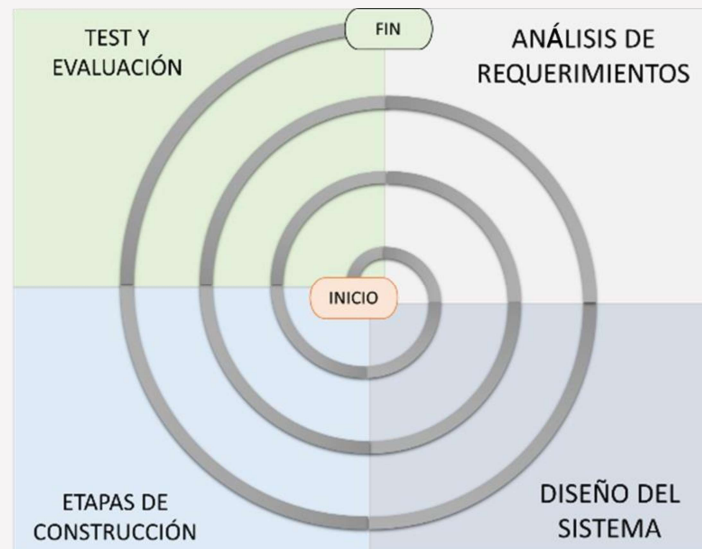


Figura 2. Diagrama de metodología de espiral.

1.3 Metodologías Ágiles

Las metodologías llamadas Ágiles cuyo principal campo de acción son las aplicaciones de software, ya que éstas permiten realizar rediseños en lapsos muy cortos y de manera remota mediante el uso de servidores, lo que permite realizar cambios incluso cuando el software está siendo usado. Estas metodologías tienen los siguientes objetivos:

- El buen funcionamiento del equipo antes que el proceso de diseño y las herramientas.
- Desarrollar software funcional más que una buena documentación.
- La colaboración con el cliente más que tener un contrato.
- Responder a los cambios más que seguir estrictamente un plan

Y de estos objetivos surgen los siguientes principios:

- Satisfacer al cliente mediante entregas tempranas y continuas de software que agreguen valor
- Aceptar los cambios para dar al cliente una ventaja competitiva
- Se entrega software funcional frecuentemente, más que planeaciones.
- Se debe trabajar junto con el cliente a lo largo del proyecto
- Generar un ambiente confortable para los diseñadores y confiar en ellos para finalizar el trabajo
- Genera un clima de comunicación y confianza entre los diseñadores
- La medida de progreso es la cantidad de software funcional que se entrega
- Se debe mantener un ritmo y calidad de diseño

- La atención a la calidad mejora el diseño y la agilidad
- La simplicidad es esencial
- La arquitectura y organización se dejan a los diseñadores
- La evolución del equipo es algo natural.

Algunas de las diferencias entre las metodologías tradicionales y las ágiles se muestran en la Tabla 1.

Metodologías Ágiles	Metodologías Tradicionales
Basadas en heurísticas	Basadas en normas
Preparados para cambios	Resistencia a los cambios
Impuesta por los diseñadores	Impuesta externamente
Proceso con pocas políticas	Proceso con numerosas políticas
Cliente es parte del equipo de desarrollo	El cliente interactúa mediante reuniones

Tabla 1. Metodologías ágiles y tradicionales.

Una de las metodologías ágiles es la conocida como *SCRUMM*, el enfoque de esta metodología es el desarrollo de software de manera rápida y eficiente, lo cual se logra dividiendo el proyecto en múltiples partes más manejables, asignando cada parte a un equipo multidisciplinario para que todas las partes puedan trabajar simultáneamente en el desarrollo del software [24]. Los equipos se reúnen diariamente durante quince minutos junto a los clientes para coordinar e integrar las diferentes partes de cada iteración, lo cual permite evaluar la posibilidad de cambios de forma rápida y que el proceso no se detenga en caso de que una parte de este presente algún retraso [25]. Otra metodología es *Cristal*, cuya característica es que considera al equipo de diseño como factor determinante para el éxito del proyecto por lo que se exhorta al desarrollo de habilidades y destrezas de sus integrantes, el desarrollo de software se considera un juego entre los recursos y los objetivos del proyecto [21]. La *Dynamic Systems Development Methods* (DSDM) es una metodología cuyo proceso es iterativo e incremental, donde el equipo de desarrollo y el usuario trabajan juntos. Propone cinco fases: estudio de viabilidad del negocio, modelado funcional, diseño, construcción, e implementación. Las tres últimas son iterativas, además de existir realimentación a todas las fases.

La *Adaptive Software Development* es una metodología con un proceso iterativo compuesto por 3 etapas: especulación, colaboración y aprendizaje. En la primera etapa se define el proyecto, en la segunda se genera el prototipo y finalmente la etapa de aprendizaje se revisa la calidad y entrega al cliente para hacer las correcciones necesarias.

Lean Development es metodología para el diseño de software que surge como una adaptación de la filosofía de manufactura esbelta creada por Toyota y los principales puntos de esta metodología son:

- Eliminar desperdicios: Todo lo que no añade valor al cliente es considerado como un desperdicio eliminando actividades innecesarias
- Ampliar el aprendizaje: Para evitar desperdicios debe escribirse código implementarlo y evaluar en vez de generar documentación, cada proyecto requiere de nuevas habilidades.

- Decidir lo más tarde posible: los mejores resultados se alcanzan con un enfoque basado en opciones por lo que se pueden retrasar las decisiones tanto como sea posible hasta que éstas se basen en hechos y no en suposiciones y pronósticos inciertos.
- La ideología de producción *Just In Time*, podría aplicar a programas de desarrollo, reconociendo sus necesidades específicas y el ambiente. Lo anterior se logra mediante la presentación de resultados, la necesidad de dejar que el equipo se organice y dividiendo las tareas para lograr el resultado necesario para una iteración específica.

Extreme Programming (XP) es una metodología centrada en aprovechar las relaciones interpersonales como clave para el éxito en desarrollo de software está comprendida por diferentes etapas [26].

- Exploración: etapa en la cual los clientes plantean a grandes rasgos las características del usuario y del sistema solicitado.
- Planificación de la entrega: en esta etapa el cliente indica la prioridad de cada una de las características del sistema, información que los diseñadores evaluarán para programar un calendario de entregas.
- Iteraciones: Para poder entregar un producto final es necesario realizar varias iteraciones de las cuales la primera tiene por objetivo definir una estructura base que sirva para todo el proyecto, esta se puede lograr en base a las características del usuario y del sistema.
- Producción: compuesta por pruebas de rendimiento al sistema antes de ser implementado con el cliente con la finalidad de obtener propuestas de mejora al sistema actual.
- Mantenimiento: etapa en la cual se debe proveer al cliente del soporte para las propuestas que se han implementado y que sigan siendo funcionales mientras se desarrollan nuevas iteraciones.
- Muerte del proyecto: cuando el sistema se ha desarrollado tomando en cuenta todas las peticiones del cliente y solo resta hacer mejoras en cuanto al rendimiento y la confiabilidad del sistema.

Se centra en entregar al cliente versiones funcionales de la solución y continuar el proceso de diseño mientras la solución se encuentra en uso, así gracias a la interacción del usuario con el sistema a etapas tempranas del diseño se pueden realizar cambios de acuerdo con la experiencia que tenga el usuario con la versión del sistema ya que se considera que el cambio de los requisitos es algo natural [21]. Esta metodología inicialmente no da importancia a la formalidad y el papeleo, ya que tiene como objetivo el cumplir con las necesidades del usuario, así que el diseñador entrega mejoras al sistema en tiempos muy cortos de hasta una semana dependiendo de la complejidad del sistema [27].

Otra metodología es la de *Diseño Centrado en el Usuario*, la cual toma como parte central del diseño al usuario y todas las decisiones están en función de este. Existen diferentes autores que consideran esta metodología una pauta para el diseño tal es el caso de [3], [9], [28]. Los pasos que se deben seguir para esta metodología son tan importantes en la etapa de diseño que se dedicara un capítulo completo para explicar cada uno de ellos.

CAPITULO II: METODOLOGÍA UCD

En algún momento, los usuarios pueden encontrarse en situaciones que les impidan realizar sus tareas de manera efectiva, por ejemplo, cuando ingresan a un estacionamiento y el expendedor de boletos está muy alejado, o el botón de la maquina es tan pequeño que necesitan esforzarse más de lo necesario para poder presionarlo. En otros casos se pueden ver páginas de internet que venden productos, cuyas características y precio son fácilmente identificadas, sin embargo, al tratar de comprar algún producto, a los usuarios les puede tomar más de un intento y pérdida de tiempo porque el botón que inicia el trámite de pago no es visible o es difícil de visualizar, es entonces que se decide salir de la página y buscar otra que permita de manera sencilla comprar lo que desea.

Lo anterior es un claro ejemplo de las consecuencias de no tener un buen diseño, pues éste debería ayudar al usuario a alcanzar sus objetivos. Alcanzar los objetivos es el propósito de un diseño y deben responder a las preguntas *¿por qué se diseña?*, *¿quién necesita el diseño?* y *¿Por qué lo quieren?* [7].

Cuando se habla de limitaciones, se hace referencia a diversos factores, por ejemplo: ¿cuáles son los costos del producto?, ¿cuánto tiempo se tiene para diseñar?, ¿cuáles son los estándares que se deben adoptar?, ¿cuáles son los materiales?, entre otros. Estos factores determinan aspectos como la proyección, calidad y la complejidad del dispositivo. Estas limitaciones servirán para delimitar el diseño y hacer un balance de los objetivos, buscando alcanzar la mayor cantidad posible de ellos.

Con lo anterior se debe enfatizar que, no siempre se podrá cumplir con todos los objetivos, por lo que se deberá elegir cuales de estos son cruciales y se deben cumplir por completo y cuáles pueden ser alcanzados parcialmente siempre y cuando no se comprometa el diseño. Si se intenta cumplir con todos los objetivos, es probable que no se pueda entregar el prototipo a tiempo, ya que el diseño es un proceso iterativo, por lo que se pueden concluir con las siguientes afirmaciones: un diseño difícilmente está terminado a la primera y sobre todo nunca está terminado por completo [29], [20].

En el ejemplo anterior, la empresa que se dedica a vender por internet encontró una oportunidad de hacer crecer sus ventas y decidieron diseñar una página web que pudiera mostrar la buena calidad y variedad de sus productos. Sin embargo, no pensaron que el simple hecho de colocar el botón de comprar con letras más grandes tendría consecuencias tan graves.

Este tipo de errores pueden surgir cuando no se conoce a los usuarios: ¿Para qué mercado va dirigido el producto?, ¿son adultos?, ¿son jóvenes?, ¿saben usar computadora?, pero, sobre todo, cuando no se diseña siguiendo una metodología.

Error es humano [7], y por esa razón es importante evitar en medida de lo posible la probabilidad de error con dispositivos *consistentes*⁴. Es bueno tener diseños que puedan manejar errores, pero es mejor un diseño que no permita cometer errores. No tiene sentido usar como excusa la naturaleza humana para justificar todos los errores de uso, cuando

⁴ La consistencia se refiere a la semejanza en el comportamiento que surge de situaciones similares u objetivos de tareas similares [3]

esto se puede evitar diseñando de manera correcta en base a criterios ya establecidos, pues esto mitiga la probabilidad de error [28].

La UCD, toma al usuario como el centro de todas las decisiones que afectan el diseño del producto, haciéndolo parte del proceso de diseño en todas sus etapas. Lo que ayuda a cumplir con las expectativas del usuario, el producto final puede ser algo tangible, como un dispositivo, una máquina; o intangible, como una página web, un programa o una aplicación para teléfonos celulares; o una mezcla entre software y hardware.

UCD ayuda a diseñar prototipos consistentes e identificar problemas a etapas tempranas del diseño cuando los cambios no representan mayor problema sin importar si estos son radicales o no, generando ahorros económicos, de tiempo y esfuerzo.

El proceso de diseño está representado por la Figura 3.

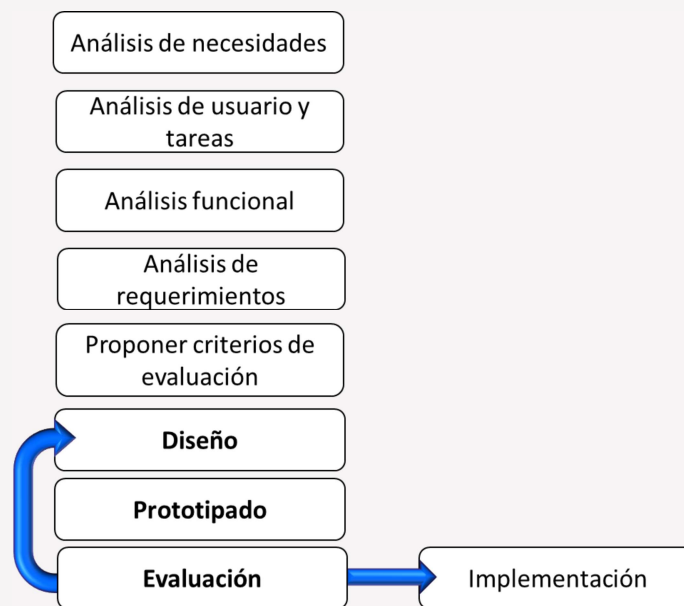


Figura 3. Diagrama de flujo UCD basado en [20].

Se puede observar que las etapas de diseño, prototipo y evaluación son iterativas cuyo límite de iteraciones depende de múltiples factores entre los cuales se pueden destacar los objetivos, el tiempo, costo y la calidad del diseño.

2.1 Análisis de necesidades

Esta etapa los usuarios describen de la forma más simple posible las necesidades que tienen y tratan de conceptualizar el tipo de sistema que desea construir, el objetivo que debe cumplir y los beneficios en caso de llevarlo a cabo. Los aportes hechos por los usuarios en esta etapa deben ser considerados durante el desarrollo pues a menudo dichos aportes son desechados lo que resulta en rechazo a usar la plataforma como se menciona en [30].

2.2 Análisis de usuario y de tareas

Esta etapa busca conocer al usuario, su entorno, cuáles son sus habilidades, limitaciones expectativas; se determinarán los objetivos del usuario, las actividades que se han de

realizar para alcanzar estos objetivos, el uso de escenarios. Cada objetivo deberá ser analizado cuidadosamente y descompuesto en tareas para encontrar los casos en los que se pueden cometer errores y así buscar la manera de evitarlos en medida de lo posible [17].

Se habla usuarios en plural porque un diseño comúnmente no solo tiene a un usuario. Es difícil que un diseño tenga a una sola persona por usuario, se pueden tener usuarios primarios los cuales interactúan directamente con el dispositivo, sin embargo, también se puede contar con usuarios secundarios, los cuales interactúan de manera indirecta con el dispositivo; además existen las partes interesadas, que son quienes no interactúan de manera directa con el dispositivo, sin embargo, el diseño afectará en sus actividades.

Conocer a nuestros usuarios es importante, porque son ellos quienes harán uso del dispositivo y quienes determinarán el éxito o fracaso de nuestro diseño.

¿Por qué, si para realizar el diseño de un aparato físico se toman en cuenta características muy específicas de sus materiales como la resistencia, dureza, durabilidad, brillo, conductividad, entre otras?, cuando hablamos de usuarios cuyas características son parte de nuestros recursos, ¿Por qué no lo hacemos de la misma manera? El éxito de la metodología UCD no radica en los métodos usados, sino más bien en el hecho de que el usuario es el centro del diseño.

Conocer e involucrar a nuestros usuarios en el desarrollo del prototipo permite ahorrar tiempo, dinero y esfuerzo, ya que es más simple hacer cambios a etapas tempranas del diseño, detectar errores, ayuda a alcanzar los objetivos.

Una manera de lidiar con el problema de caracterizar a nuestros usuarios es realizar una caracterización general de ellos; determinar si son personas que lean instrucciones antes de usar un dispositivo, si son personas que están acostumbradas al uso de una computadora, investigar características físicas de nuestros usuarios como son edad, limitaciones, habilidades. También es importante saber las diferencias culturales que tienen nuestros usuarios, como el nivel de educación que tienen, profesión, especialización.

A continuación, se listan algunas capacidades y características útiles para la caracterización de los usuarios.

2.2.1 Capacidades de los seres humanos

La información que los seres humanos podemos recibir del medio que nos rodea llega a nosotros a través de los diferentes canales o sentidos: vista, tacto, oído, gusto y olfato. Para cada canal se pueden desarrollar dispositivos que estimulen estos sentidos, cabe mencionar que tanto el gusto como el olfato, son hasta ahora los menos explotados debido a su complejidad. El sentido más desarrollado que tenemos la mayoría de las personas es la vista.

La vista es la fuente primaria de información para la mayoría de las personas, el instrumento necesario para obtener esta información es el ojo. El proceso de visión se puede dividir en dos etapas: la física y la de interpretación (sentido que le damos a las cosas que vemos).

El oído, es el segundo sentido más desarrollado, se encarga de percibir las ondas de sonido que llegan a su interior. El cual está compuesto por tres partes, el oído externo, el oído medio y el oído interno. La percepción de los sonidos también está limitada. Las frecuencias audibles van desde los 20 Hz hasta los 20 kHz. A frecuencias bajas, la percepción del oído es muy precisa, pudiendo detectar cambios de hasta 1.5 Hz, pero a frecuencias cada vez más altas, se va perdiendo dicha precisión.

El tacto es el sentido que percibe a través de la piel, la cual tiene tres diferentes receptores: los mecano-receptores, los termo-receptores, y los nociceptores; quienes se encargan de recibir estímulos de presión, de temperatura y de dolor respectivamente. A pesar de que todo el cuerpo está cubierto por la piel, algunas áreas tienen mayor sensibilidad que otras; otro aspecto importante sobre el sentido del tacto es que tiene una parte kinestésica, la cual se encarga de advertirnos sobre la posición del cuerpo y de nuestras extremidades.

El *movimiento* es un canal de salida por medio del cual podemos interactuar con las máquinas y debe ser tomado en cuenta al momento de diseñar. El tiempo de desplazamiento depende en gran medida de las características físicas de los sujetos: edad y condición física, por ejemplo. El tiempo de reacción varía de acuerdo con el canal sensorial a través de la cual se recibe el estímulo. Una persona puede reaccionar a una señal auditiva en aproximadamente 150 ms, a una señal visual en 200 ms y para el dolor en 700 ms, sin embargo, esto puede cambiar con la práctica y de sujeto a sujeto.

La velocidad y la precisión de movimiento son consideraciones importantes en el diseño de sistemas interactivos, y según [10], la resolución de salida controlada es de 10 Hz y se han encontrado que cuando los sujetos tiemblan, los picos en el espectro de señal del movimiento llegan a ocurrir a los 25 Hz. La frecuencia a la que podemos percibir estímulos es de hasta 1 kHz.

La *memoria* es nuestra capacidad para almacenar información que proviene de cada canal y está limitada de igual manera por el cerebro, ya que este no puede almacenar toda la información que está recibiendo, sino que almacena únicamente lo que es más significativo y las ideas centrales. La memoria se divide en tres, memoria sensorial, la memoria a corto plazo y la memoria a largo plazo.

- Memoria Sensorial: es la memoria que almacena información proveniente de los sentidos y ésta solo dura unos instantes después del estímulo.
- Memoria a Corto Plazo: memoria que puede almacenar 7 ± 2 estímulos, es de acceso muy rápido: 70 ms. La información que almacena no necesariamente pasará a la memoria a largo plazo.
- Memoria a Largo plazo: En ella se almacena toda la información que poseemos sobre nuestras experiencias, el conocimiento, los procedimientos, reglas de comportamiento; y es de acceso lento: 0.1 s.

Habilidades

La solución de problemas no siempre implica situaciones desconocidas, casi siempre son situaciones conocidas, de las cuales poco a poco se adquiere habilidad para resolver una tarea. El modelo de Anderson el cual tiene tres niveles; el primer nivel se basa en el conocimiento, el segundo se basa en el proceso y el tercero representa un comportamiento hábil, este comportamiento hábil puede ser incluso automático, sin embargo, tal

comportamiento experto puede provocar errores cuando el contexto de la actividad cambia.

Errores y modelos mentales

Nuestra capacidad para manejar información, no nos exenta de cometer errores, algunos triviales otros no. El error humano puede llevar a consecuencias catastróficas, por lo que debemos entender porque cometemos errores y cómo podemos evitarlos. Una de sus causas, es el cambio de contexto; otra causa es una comprensión incorrecta de una situación o del estado del sistema. Los usuarios construyen sus teorías sobre el funcionamiento de un sistema, los cuales son conocidos como *modelos mentales*, éstos pueden ser superficiales e inconsistentes [19].

Es necesario mantener esas consistencias en los diseños para evitar errores, sin embargo, en caso de que se requiera cambiar un modelo mental, es necesario mantener informadas a las personas.

2.2.2 Análisis de tareas

Después de haber investigado cual es el perfil general de nuestros usuarios, el siguiente paso es saber cuáles son las actividades que realizan en el trabajo, el tipo de lenguaje que usan, si el usuario es un novato o un experto en el uso de sus herramientas de trabajo.

Con estos aspectos ya deberemos ser capaces de definir cuantos tipos de usuarios tenemos. Si se tienen un solo tipo que sea primario o existen algunos secundarios, o incluso si existen partes interesadas, según sea el caso.

Una manera de obtener información sobre como desarrollan sus tareas, es verlos interactuar con dispositivos parecidos a los que se desea construir, con el fin de analizar cuáles son las tareas que realiza con el fin de alcanzar un objetivo específico.

Podemos hacer un análisis del flujo de trabajo, el cual nos ayuda a definir cuáles son los pasos que una persona realiza en una cadena de actividades en conjunto con otras personas. El análisis del trabajo se centra únicamente en las actividades que realiza una persona. Para tener un mayor grado de detalle se puede hacer una lista de las tareas específicas que realiza el usuario para cumplir con cierta tarea, que tan específicas son las tareas depende de nosotros y de los objetivos que busquemos cumplir [17].

La secuencia de las tareas determinara cual es el orden que deben llevar las actividades y esto se puede definir observando a los usuarios realizar su trabajo, también podemos definir jerarquías para cada una de las tareas y así identificar cuáles son tareas o subtareas e identificar que tareas forman parte de una tarea más grande. La técnica que va más a detalle en cada una de las actividades es la de análisis de procedimiento, la cual analiza cada una de las decisiones y acciones que debe realizar el usuario para cumplir con una tarea específica.

Es importante saber cuáles son las técnicas que se pueden usar para conocer a fondo como es que se llevan a cabo las actividades y así poder organizarlas correctamente, dichas técnicas tomadas de [20] se mencionan en seguida.

- *Piensa en alto (Think Aloud)*; en esta técnica se le pide al usuario que desempeñe su trabajo como normalmente lo hace, a diferencia de que en esta ocasión ira explicando cada una de las actividades que va realizando. Sin embargo, es importante no perder detalle ya que puede ir describiendo lo que hace, pero en algunas tareas en las que se requiere concentración normalmente baja el volumen de su voz o hace pausas y en esos momentos es crucial hacer preguntas sobre el porqué dejó de explicar y porqué esa actividad requiere especial cuidado.
- *Hablar después de*. Esta técnica será usada en aquellas situaciones en las que el usuario no pueda hablar mientras realiza su trabajo, ya que en algunas ocasiones la naturaleza de su trabajo se lo impide. Consiste en tomar nota de las tareas que realiza el usuario y en cuanto este pueda hablar, se le harán preguntas sobre las notas que se tomaron mientras realizaba su trabajo.
- *Juego de Rol*. Si por alguna razón el usuario no puede realizar su trabajo porque no es requerido o por alguna otra situación, entonces será necesario simular una situación de trabajo. Esta técnica no es muy buena, ya que solo es una simulación y no se apega exactamente la realidad.
- *Grabaciones*. Se usan cuando el usuario no puede atendernos mientras realiza su trabajo, entonces se graba a la persona durante un día normal de trabajo y después se revisan los videos en busca de información.
- *Grupos de enfoque*. Con esta técnica se realiza una reunión con personas que puedan proporcionarnos información acerca de nuestros usuarios. El inconveniente es que, al hacer una reunión, se puede perder el tiempo con temas que no tienen relevancia para el sistema y con nuestros usuarios.
- *Cuestionarios*. Se pueden diseñar cuestionarios para obtener información específica sobre el perfil de nuestros usuarios, sin embargo, cuando se aplica un cuestionario se corre el riesgo de que las personas contesten lo que queremos oír y no lo que es en verdad.
- *Reclutamiento*. En caso de no poder acceder a nuestros usuarios, existen empresas que pueden reclutar a persona que cumplan con el perfil que buscamos. Podemos usar a familiares, sin embargo, ellos pueden no ser honestos con nosotros.
- *Análisis del ambiente*. Este punto es de especial interés porque va a proporcionarnos información que nos permitan evitar accidentes. Este tipo de información se refiere a el ambiente en el cual va a estar expuesto nuestro proyecto. De no tomarse en cuenta esto podemos exceder las capacidades físicas cognitivas de nuestros usuarios, además de exceder las capacidades de nuestro sistema y podemos provocar que deje de funcionar, lo cual puede dar pie a accidentes.

Una vez que se va a iniciar el análisis de nuestro usuario surge una pregunta, ¿Cuántas personas son necesarias para obtener la información necesaria como para realizar un prototipo?, en algunas aplicaciones tener acceso a todos los usuarios es fácil, sobre todo cuando son solo dos o tres, sin embargo, como ya sabemos, el sistema con un solo tipo de usuario es muy raro. Lo ideal sería tener acceso a todos los usuarios, sin embargo, no siempre es posible; en esos casos, lo que podemos hacer es imaginarnos cuáles son sus experiencias, sin embargo, aplicar este método es delicado ya que es muy difícil deshacernos de nuestras experiencias y evitar que estas influyan en las decisiones de diseño.

Una vez que se cuenta con los usuarios para el análisis de las tareas y actividades, también es importante que se usen escenarios, estos son historias de diseño, son muy simples y sencillos pero muy útiles, mientras más detalles añadimos a las pequeñas historias las hacemos más reales y por ende más útiles para detectar errores [7].

Los *escenarios* representan una manera en la cual se va a usar el dispositivo [5], además de que nos sirven para saber dónde está el usuario, podemos ubicarnos, es decir en que paso de la interacción con la maquina estamos, y hacia donde podemos ir. Usar escenarios en el análisis de tareas, es importante ya que son pequeñas pautas del diseño que ayudan en la evaluación heurística de diseño, para precisar especificaciones, implementaciones y mejoras.

2.3. Análisis funcional

El análisis funcional define cuales son las funciones y características que debe cumplir el sistema para que el usuario pueda cumplir con las tareas y objetivos, también define que actividades deben realizarse de manera automática o cuales de ellas requieren de la intervención del usuario.

2.4. Análisis de requerimientos

Para definir cuáles son los elementos que se necesitan para cumplir con los objetivos del diseño, se utilizan objetos tangibles e intangibles. En esta etapa es necesario tener bien claras cuáles son las necesidades, objetivos y haber caracterizado a nuestro usuario porque de ello depende que tipo de elementos se vayan a usar.

2.5. Proponer criterios de usabilidad

Al ser el usuario el centro de todas las decisiones es necesario conocer sus limitaciones. Nuestra naturaleza nos expone a cometer errores por lo que es importante que el sistema deba estar diseñado para reducir la probabilidad de cometerlos y evitar sus consecuencias. El diseño debe tener atributos que dan al usuario una idea clara de cómo se debe usar el dispositivo (*affordance*) [5], debe informar sobre la situación actual del proceso que está sucediendo; las personas mientras más informadas estén es mejor, ya que conocer a fondo el procedimiento ayuda a tomar decisiones más acertadas. Las interfaces que son *inconsistentes* inevitablemente llevarán a cometer errores. Un diseño debe diseñarse pensando para cumplir con las evaluaciones heurísticas de usabilidad definidas por Nielsen [29]:

- *Visibilidad del estado del sistema.* El sistema debe informar a los usuarios del estado del sistema, dando una retroalimentación apropiada en un tiempo razonable.
- *Utilizar el lenguaje de los usuarios.* El sistema debe utilizar el lenguaje de los usuarios, con palabras o frases que le sean conocidas, en lugar de usar términos técnicos, para que al usuario no se le dificulte utilizar el sistema.
- *Control y libertad para el usuario.* En casos en los que los usuarios elijan una opción del sistema por error, éste debe contar con las opciones de deshacer y

rehacer para proveer al usuario de una salida fácil sin tener que utilizar un diálogo extendido.

- *Consistencia y estándares.* El sistema debe de cumplir las normas y convenciones que el usuario ya conoce, para que éste, no se tenga que preguntar el significado de las palabras, situaciones o acciones del sistema.

- *Prevención de errores.* Es más importante prevenir la aparición de errores que generar buenos mensajes de error. Hay que eliminar acciones predisuestas al error o, en todo caso, localizarlas y preguntar al usuario si está seguro de realizarlas.

- *Minimizar la carga de la memoria del usuario.* El sistema debe minimizar la información que el usuario debe recordar, mostrándola a través de objetos, acciones u opciones. El usuario no tiene por qué recordar la información que recibió anteriormente. Las instrucciones para el uso del sistema deberían ser visibles o estar al alcance del usuario cuando se requieran.

- *Flexibilidad y eficiencia de uso.* Los aceleradores permiten aumentar la velocidad de interacción para el usuario experto tal que el sistema pueda atraer a usuarios principiantes y experimentados. Es importante que el sistema permita personalizar acciones frecuentes para así acelerar el uso de éste.

- *Diálogos estéticos y diseño minimalista.* La interfaz no debe contener información que no sea relevante o se utilice raramente, pues cada unidad adicional de información en un diálogo compite con las unidades relevantes de la información y disminuye su visibilidad relativa.

- *Ayudar a los usuarios a reconocer, diagnosticar y recuperarse de los errores.* Los mensajes de error deben expresarse en un lenguaje claro, indicar exactamente el problema y ser constructivos.

- *Ayuda y documentación.* Es mejor un sistema que no necesite documentación, pero puede ser necesario que el usuario disponga de ella. Si así es, la documentación tiene que ser fácil de encontrar, estar centrada en las tareas del usuario, tener información de las etapas a realizar y no ser muy extensa.

En resumen, el usuario al usar el sistema debe poder imaginar lo que tiene que hacer y saber lo que está pasando; si cumple con esto, la capacitación para el uso de la plataforma debe bastar con una breve plática.

Los criterios de usabilidad son los parámetros que nos ayudaran a evaluar si nuestra plataforma está bien diseñada o no, dependiendo de los objetivos y tareas que va a realizar. Existen los criterios de *eficacia, eficiencia y nivel de satisfacción*, cada uno de ellos tiene maneras diferentes de evaluarse según la tarea que realiza el dispositivo a diseñar.

2.6 Diseño

En esta etapa se decide en base a las necesidades y al estudio de nuestros usuarios la forma que va a tener el prototipo [4], como va a estar configurado de tal modo que sea consistente y así obtener un prototipo que tenga el menor número de iteraciones, ahorrando tiempo y esfuerzo, cabe mencionar que en las primeras iteraciones se puede

hacer uso de herramientas de papel o diagramas que permita llegar más rápido a una solución, es decir se puede generar un “prototipo” en papel explicando el funcionamiento e incluso obteniendo retroalimentación con pruebas hechas en papel pruebas sin necesidad de realizar programar o realizar físicamente avances [31], con lo cual se puede dar más opciones de solución que pueden disminuir el número de iteraciones y modificaciones a un costo prácticamente nulo.

2.7 Prototipado

Lo que se busca en esta etapa es materializar el diseño, sin embargo, en esta etapa únicamente se busca que sea funcional es decir aun no estará terminado para su implementación. Los prototipos pueden ser evolutivos (es parte del diseño final), desechables (completamente diferente y el diseño final solo se realiza para obtener las características del sistema) [20].

2.8 Evaluación

En esta etapa se deben poner a prueba los objetivos del prototipo en un escenario lo más cercano a la realidad, existen dos maneras de hacerlo, mediante una prueba basada en los usuarios y una prueba basada en expertos en interacción. Cuando se hace una evaluación basada en expertos se contrata a un grupo de expertos en usabilidad quienes pondrán a prueba el prototipo [20], y ellos darán su opinión como expertos en el área determinando el grado de usabilidad del dispositivo, con lo cual se pueden realizar modificaciones según sea o no necesario.

En las pruebas con usuarios, se pide al usuario resolver un escenario de prueba en el que se realicen tareas representativas con el prototipo para comprobar que cumpla con los criterios de usabilidad establecidos, además se pueden aplicar cuestionarios para conocer el grado de usabilidad y de satisfacción percibida por el usuario y analizar los resultados de las pruebas, para hacer modificaciones al prototipo en caso de ser necesarias. Los cuestionarios que se pueden aplicar son; Single Ease Question, para conocer el grado de efectividad de la plataforma [32] y el cuestionario SUS para obtener una medida compuesta de la usabilidad general del sistema la cual no es aceptable si se obtienen valores menores al 64 %, aceptable si el valor se encuentra entre 65 y 84 %, y excelente si el valor es superior a 85 % [33].

El lugar para realizar pruebas de usabilidad típicamente consiste en dos habitaciones comunicadas por un espejo de una sola dirección. En la habitación de observación se encuentra el usuario, una computadora y dos cámaras. Mientras que, en la segunda, se encuentra el observador. Sin embargo, cuando el presupuesto es limitado o no se cuenta con un escenario especializado para pruebas de usabilidad, éstas se pueden llevar a cabo en una habitación, con dos sillas escritorio una computadora y una cámara de video. Si bien, este último escenario se puede montar directamente en el sitio de trabajo y se obtienen datos suficientes para la prueba, uno de los inconvenientes es que observar al usuario puede modificar su comportamiento.

Se debe contar con un equipo de apoyo que tome los siguientes roles al realizar la prueba:

- **Recepcionista**, es el encargado de dar la bienvenida, romper el hielo, explicar el propósito de la prueba al usuario, dar al usuario la carta de consentimiento informado, relajar al usuario y aliviar el estrés que el usuario pueda experimentar. Explicando que la prueba tiene por objetivo conocer el desempeño de la plataforma y no su desempeño, finalmente una vez terminada debe aplicar los cuestionarios requeridos.
- **Facilitador**: es la única persona que hablara con el usuario durante la prueba, se encarga de presentar los escenarios, leyendo las tareas que se deben realizar y dejando al alcance del usuario una carta que las describe, para consulta del usuario. También debe alentar al usuario para aplicar la técnica *Think Aloud*. No debe ayudar al usuario y, por el contrario, debe dejar que éste se esfuerce por lograr las actividades. En caso de que el usuario se “atore”, como último recurso, puede ayudarlo con un poco de información.
- **Observador**: el trabajo principal del observador es tomar notas, y tiempos en alcanzar los objetivos de las tareas y registrar cualquier situación que se le dificulte al usuario.

A continuación, se enlistan los pasos para realizar una prueba de usabilidad:

1. Desarrollar un perfil realista de los usuarios previstos
2. Planear los escenarios de prueba
3. Identificar las tareas que debe realizar el usuario
4. Especificar los datos que deben recopilarse
5. Aplicar un cuestionario al final de la prueba para saber la satisfacción del usuario
6. Realizar un formato para consentimiento informado

Con el formato de consentimiento informado, se le hace saber al usuario el objetivo y beneficios de la prueba y como se llevará a cabo la prueba, además se le puede mencionar: que participa de manera voluntaria, que conoce sus responsabilidades, que existe confidencialidad en los datos proporcionados y que estos son usados únicamente a fin de la investigación, y que en caso de que lo desee, puede abandonar la prueba en cualquier momento. Con la información obtenida durante esta etapa se determinará si el prototipo está listo para pasar a la siguiente etapa.

2.9 Implementación

Toda vez que se han alcanzado los objetivos, cumpliendo con los criterios propuestos y se esté satisfecho con el diseño, es entonces que se puede iniciar la última fase de la metodología, que es poner a funcionar el sistema planeado [34], esto conlleva la documentación del proyecto y los manuales de uso así como todo aquello que pueda ser usado en otros proyectos similares o en mejoras del mismo proyecto, también se cubre en esta etapa el despliegue del proyecto para llegar a todos los usuarios, entonces se debe comenzar a ver cuál es el plan de acción para realizar la instalación de software, o las acciones necesarias para acondicionar el área donde el proyecto se pondrá en función. Se debe considerar que es posible ya no hablar de un prototipo si no de un producto terminado para su distribución de forma masiva para lo cual se debe estandarizar el

método de implementación o de puesta en marcha, así como las medidas necesarias para la capacitación de los usuarios en el uso del sistema.

De ser necesario se deben gestionar sistemas de apoyo para el usuario los cuales pueden ser: referencia rápida, tutorial, explicaciones completas y ayuda para tareas específicas o incluso una página web en la que los usuarios puedan apoyarse para futuras consultas.

En los siguientes capítulos se aplicará la metodología UCD para el diseño de una plataforma para la valoración de la capacidad muscular de la mano por lo que durante el Capítulo 3 se analizaran plataformas similares a la que se pretende diseñar.

CAPITULO III: ESTADO DEL ARTE: PLATAFORMA

La mecanoterapia es una parte de la rehabilitación médica, en la cual es necesario realizar repetición de movimientos de las articulaciones afectadas para no perder o recuperar rangos de movimiento (ROM por sus siglas en ingles). Éstos se ven afectados por diversas causas, siendo lo accidentes cerebrovasculares la razón más frecuente, sobre todo en la población mayor. También pueden deberse a una lesión física, o fractura por lo que es necesario ayudar a las personas a recuperar o evitar perder los ROM.

La rehabilitación de una extremidad depende del tipo de lesión. Si la lesión fue cerebral dañó el área motriz, entonces para rehabilitar dicha extremidad, no basta solo con realizar los movimientos repetitivos, ya que el problema no es en la extremidad, sino en el cerebro. Por lo que será necesaria una neurorrehabilitación para ayudar a que las neuronas que no fueron dañadas a que suplan a las que ya no pueden realizar dicha tarea. A esta habilidad que tienen las neuronas de adaptarse a diferentes funciones se le conoce como neuroplasticidad [35].

Se han diseñado aplicaciones de realidad virtual, las cuales se basan en el uso de juegos para la motivación de pacientes. Una de las ventajas del uso de la realidad virtual es que nos permite realizar una evaluación neurológica utilizando los Sistemas de Juegos para Rehabilitación. Un ejemplo de ellos, lo podemos observar en la Figura 4, donde un sistema de captura de movimientos basado en visión es utilizado para hacer el seguimiento de las manos del paciente y a través de un ambiente virtual se interactúa con el paciente para que interactúe en un juego; el sistema sirve para la evaluación activa y monitoreo de pacientes con deficiencias motoras o neuropatologías [16] y con aplicaciones para terapia ocupacional.



Figura 4. Juego para sistema de Rehabilitación

Otros prototipos además de la retroalimentación visual generan una retroalimentación de fuerza o Háptica [22], tal es caso de Quasi-3-DOF Rehabilitation System for Upper Limbs (PLEMO) [36], mostrado en la Figura 5. El sistema proporciona al paciente el control de dos grados de libertad, uno pasivo (inclinación) y a través de un mecanismo de frenado proporciona la retroalimentación de fuerza necesaria para guiar al paciente para realizar las tareas asignadas y visualizar mediante una pantalla sus movimientos. Una de sus ventajas es que, al no tener motores, el sistema no se puede mover automáticamente, lo

cual ayuda a evitar que, por algún error o problema por parte del usuario al controlarlo, éste no se vea expuesto a golpe o daño. Las pruebas que se hicieron a PLEMO, no fueron con pacientes reales, lo que pone en duda su usabilidad y el diseño del dispositivo. Ya que al no haber usuarios reales no podemos definir si el sistema es apto para tareas de rehabilitación y la aplicación solo supone que puede ayudar, además de que la interfaz gráfica no cumple con el criterio de colocación [22], aspecto que es de vital importancia en tareas de neurorehabilitación.

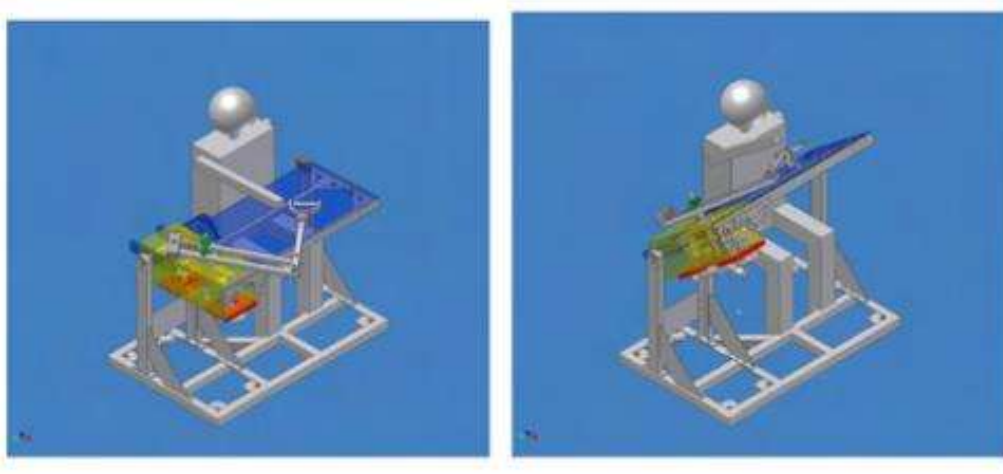


Figura 5. PLEMO en posición horizontal e inclinada

Algunos otros dispositivos cuentan con grados de libertad actuados por medio de resortes, los cuales ayudan al paciente a realizar movimientos en el proceso de rehabilitación física de algún miembro. Por ejemplo, *Hand Spring Operated Movement Enhancer* (HandSOME) [14], es un dispositivo diseñado para la rehabilitación de mano para los pacientes que sufren de un golpe en la cabeza y que pueden perder movilidad en las extremidades. En su primera etapa del tratamiento, los pacientes toman fármacos para limitar el daño cerebral y después de una semana aproximadamente comienza su neurorrehabilitación utilizando HandSOME -mostrado en la Figura 6-. Este sistema ayuda al paciente a mover los dedos de la mano para tareas de agarre. Fue puesto a prueba con pacientes y mostro ser muy útil, sin embargo, su peso de 0.22 kg fue un problema, ya que algunos de los pacientes con quienes se hicieron las pruebas de usabilidad no pudieron cargar el dispositivo [14]; lo cual es una consecuencia de no estudiar a los usuarios antes de diseñar el sistema.

Otro dispositivo que no cumple con el criterio de portabilidad es *Portable Rehabilitation Device for the Hand* (HEXOSYS) -mostrado en la Figura 7-. El cual a pesar de ser un dispositivo “portable”, presenta una estructura similar a HandSOME y de un peso de aproximadamente 1.5 kg [37]. Una de sus ventajas es que cuenta con motores, los cuales ayudan al paciente para generar los movimientos y no solo guiarlo para realizar el movimiento adecuado.



Figura 6. HandSOME tiene un peso de 0.22 kg

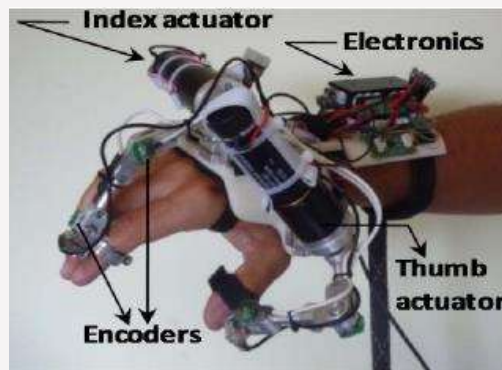


Figura 7. HEXOSYS 1.4 kg dispositivo portable

En algunas investigaciones se usa la fuerza como parámetro para evaluar a las personas que sufren de alguna discapacidad, tal es el caso de un guante instrumentado [15]. El cual permite al terapeuta obtener información cuantitativa sobre la fuerza que ejerce el paciente cuando realiza tareas de manipulación, ya que en algunas enfermedades como la hemiplejia, cuadriplejia o diplejia; normalmente se tiene el control para posicionar los miembros superiores, pero no el control del agarre ni la precisión de la fuerza de pinza de mano. El guante monitorea las actividades de tomar y soltar objetos midiendo las fuerzas en los dedos medio, índice y pulgar. Se diseñaron actividades para probar el dispositivo, la lectura de las fuerzas se muestra en una terminal de puerto serial de una computadora personal.

El dispositivo se puso a prueba con 15 personas y se obtuvieron datos que indican que para las tareas que se diseñaron, el dedo índice es el que ejerce más fuerza cuando el peso de los objetos aumenta. El diseño del guante es simple, sin embargo, las pruebas a las que fue sometido fueron sólo de funcionalidad y no de usabilidad. La interfaz que se realizó requiere de atención por parte del usuario ya que solo presenta el valor de las fuerzas adquiridas al usuario tal como se ve en la Figura 8.

Este dispositivo tiene varias desventajas; 1) su mantenimiento es un problema, ya que al ser un sistema flexible los sensores se pueden dañar con facilidad, 2) la limpieza del guante implica retirar los sensores, 3) los sensores de fuerza utilizados necesitan una carga muy puntual, por lo que el sistema debería tener un mecanismo para alinear los dedos con los sensores para que las lecturas se consideren correctas, 4) el mantenimiento del dispositivo es complicado ya que los sensores una vez que han fallado tienen que reemplazarse por completo.



Figura 8. Interfaz del sistema [15]

El mantenimiento de un dispositivo puede ser vital para que el proyecto no sea bien evaluado. Por el ejemplo, tal es el caso de [8] -mostrado en la Figura 9, cuyo diseño está muy bien fundamentado en cuanto a la parte mecánica se refiere, al igual que [38]. Se realizó un análisis exhaustivo en las ecuaciones que sintetizan el movimiento de sus mecanismos y en su construcción y se dejó como trabajo a futuro las pruebas con pacientes reales. Los usuarios finales no se involucraron en etapas tempranas del diseño como lo recomienda la FDA [13], por lo que, en caso de falla mecánica del sistema, éste al tener tantas piezas, hace imposible que los usuarios lo puedan arreglar. Lo cual repercute en un gasto tanto económico como de esfuerzo y tiempo.



Figura 9. Prototipo para rehabilitación de mano de Huang and Low 2008.

Los dispositivos que ayudan a los pacientes a realizar movimientos con el fin de rehabilitar alguna parte del cuerpo requieren de partes mecánicas, unos en mayor cantidad que otros, aquellos que solo sirven para monitorear o evaluar al paciente generalmente son los que tienen menos piezas mecánicas, como el caso del guante instrumentado o de las pelotas para medir la fuerza ejercida por la mano. Éstas, sin embargo, tienen la desventaja de medir únicamente la presión resultante de la mano en la pelota y no pueden medir la fuerza ejercida por cada dedo [39].

La implementación exitosa de los dispositivos de rehabilitación física debe tomar en cuenta tanto aspectos de ingeniería como aspectos de rehabilitación [40]. Un ejemplo del desarrollo de un sistema donde se tomaron en cuenta solamente criterios ingenieriles es el trabajo [40]. En el cual realizaron una comparación entre diferentes dispositivos diseñados para diferentes tareas de rehabilitación de la mano; algunos fueron diseñados para un solo dedo o para la mano completa, los cuales se muestran en la Figura 10. La mayoría de ellos son complejos y costosos para la mayoría de los centros de rehabilitación.

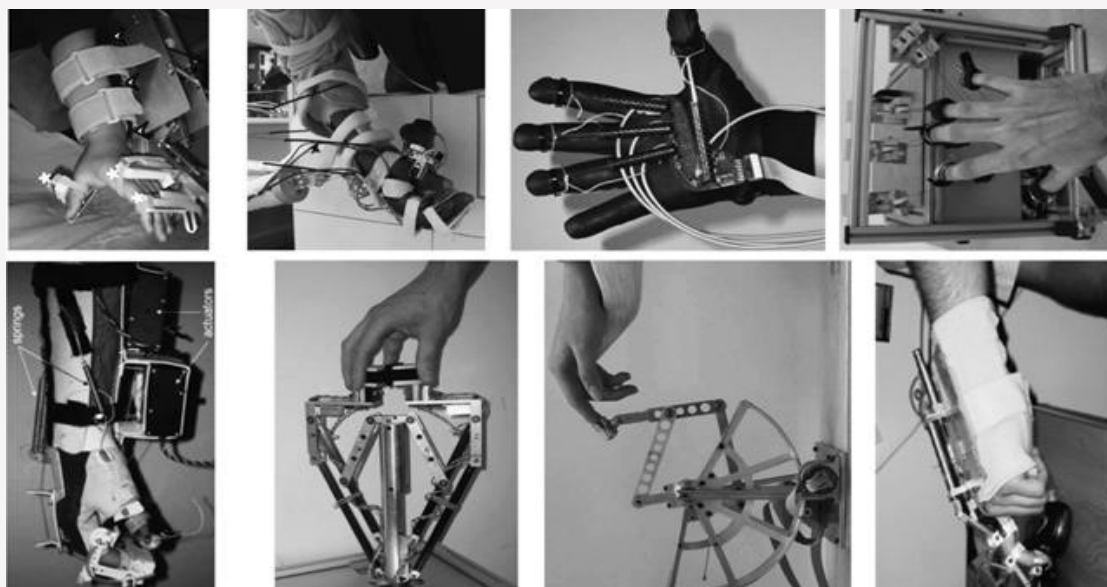


Figura 10. Dispositivos para rehabilitación [40].

Los juegos de realidad virtual (VR por su acrónimo en inglés) han pasado a ser una herramienta muy útil para la rehabilitación, ya que proveen de retroalimentación y motivación para el paciente durante una terapia de rehabilitación. Las terapias de rehabilitación son monótonas, aburridas e incluso dolorosas lo cual provoca que pocas personas sean quienes terminen una terapia física.

La VR tienen un potencial muy grande para retener a los pacientes en sus terapias utilizando juegos. Por ejemplo, en [39], se utiliza una pelota inflable a la que midiendo la presión que ejerce sobre ella generada por la mano del paciente es posible interactuar en un juego Figura 11. La interfaz gráfica es atractiva, sin embargo, a pesar de que es un sistema para rehabilitación, éste no entrega información sobre dicho proceso, se limita únicamente a mantener enganchados a los pacientes; se deja como trabajo a futuro la generación y almacenamiento de la información, que realmente es relevante para evaluar a un paciente, como la velocidad, la fuerza, etc.



Figura 11. Juego de rehabilitación [41].

En [42], se muestra un dispositivo donde únicamente se toma lectura de sensores de flexión cuya información se despliega en una pantalla de cristal líquido, Figura 12. En este dispositivo que tiene por objetivo medir los rangos de movimiento del brazo humano utilizando una combinación acelerómetros y sensores de fuerza. Sin embargo, nunca se hacen pruebas rigurosas de usabilidad, lo cual impide saber si realmente el usuario final podría hacer una medición correcta usando el dispositivo.

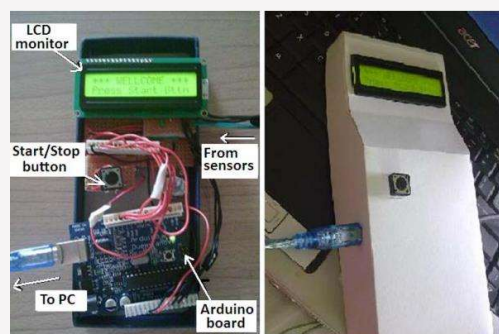


Figura 12. Dispositivo para leer sensores [42].

CAPITULO IV: PLATAFORMA DE APOYO PARA LA VALORACIÓN DE LA CAPACIDAD MUSCULAR DE LA MANO

En esta sección, se describe el proceso de desarrollo de la plataforma para la valoración de la capacidad muscular de la mano. Según lo presentado en los capítulos anteriores, existen diferentes puntos de vista en cuanto a las etapas que la metodología UCD tiene. Este trabajo, se basa en el diagrama de bloques presentado en [20], el cual por comodidad se presenta nuevamente en la Figura 13. A partir de él, se comenzará a describir cada una de sus etapas e iteraciones hasta llegar al prototipo final.

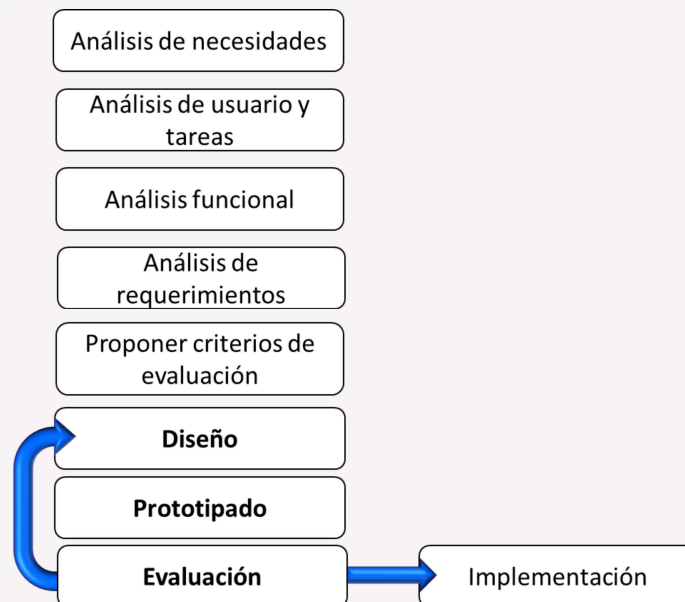


Figura 13. Diagrama de flujo UCD basado en [20].

4.1. Análisis de Necesidades

Siguiendo el diagrama, la primera etapa de la metodología marca la identificación de necesidades; para tal efecto se acudió a entrevistas con los médicos y especialistas en terapia física y terapia ocupacional del CREE y de la Facultad de Medicina de la UAEM Figura 14, quienes expresaron su inquietud por un sistema que les ayude a mitigar la subjetividad con la que evalúan la capacidad muscular de la mano de sus pacientes, ya que hasta el momento dicha evaluación depende de la experiencia del médico.



Figura 14. Entrevista con especialistas en rehabilitación Física de la Facultad de Medicina de la UAEM.

De esta primera entrevista, surgió la necesidad de desarrollar un dinamómetro de mano que pudiera medir la fuerza que se ejerce sobre él y que permitiera almacenar información para realizar un análisis posterior de los datos; ya que las herramientas con que cuentan actualmente son simples y no cuentan con la funcionalidad que les permita obtener datos cuantitativamente Figura 15.



Figura 15. Herramientas para medición de fuerza y rehabilitación.

Se acordó con los terapeutas que se diseñaría una plataforma para apoyarlos a valorar la capacidad muscular de la mano en base a datos cuantitativos más que cualitativos. En ambas instituciones, se atienden pacientes que han sufrido de accidentes cerebrovasculares, lesiones, o enfermedades que han afectado la fuerza y los ROM en las extremidades superiores. Las características que debe medir dicha plataforma son: la fuerza máxima, fuerza promedio, la fatiga, índice de variación y almacenar un histórico de las pruebas realizadas en una base de datos. La única limitante que se definió en esa primera entrevista fue que el paciente pueda flexionar los ROM completos en cada uno de los dedos para poder ser evaluado.

4.2 Análisis de usuario y de tareas

Una vez definidas la necesidad y con ello el objetivo del diseño, se pasa a la siguiente etapa de la metodología: la definición del usuario o usuarios. Se revisó la literatura y según [20], debido a que la plataforma está compuesta por una parte de software y otra de hardware, se consideró tener dos tipos de usuarios: primarios y secundarios. Para el software el usuario primario es el terapeuta, ya que él es quien lo usa para obtener y

almacenar la información para valorar la capacidad muscular de la mano del paciente. El paciente es el usuario secundario ya que no lo usa directamente, sin embargo, es evaluado por el terapeuta y por el software. En cuanto a la parte del hardware, el paciente será el usuario primario y el terapeuta el secundario. Lo anterior se debe a que el paciente usará el dispositivo que permitirá al terapeuta obtener la información que le ayudara a evaluar el desempeño de este durante las pruebas. La representación gráfica de los roles está representada por la Figura 16.

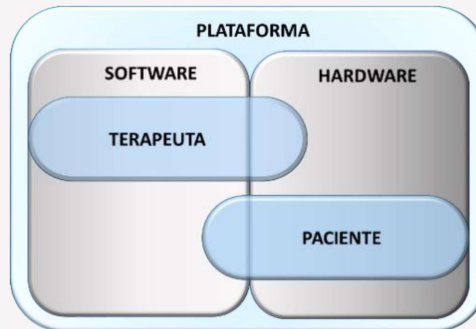


Figura 16. Roles de los usuarios para la plataforma.

Se hace énfasis en la manera en que se definieron los roles de los usuarios, ya que la idea es proporcionar únicamente una herramienta en la cual el terapeuta pueda apoyarse para evaluar la capacidad muscular y no en el desarrollo de un dispositivo de rehabilitación.

El objetivo que se quiere lograr con el dispositivo es valorar la capacidad muscular de la mano cubriendo las siguientes tareas: 1) Medición de la fuerza máxima que una persona es capaz de ejercer voluntariamente, 2) Medición de la fuerza máxima después un lapso de 60 segundos de fatiga, 3) Obtención del coeficiente de variación y 4) Obtención de la fuerza promedio. Ahora es necesario conocer a nuestros usuarios tanto primarios como secundarios.

4.2.1 Usuario Terapeuta

El terapeuta es el especialista en rehabilitación física capaz de diagnosticar y llevar a cabo sesiones de rehabilitación, con conocimientos especializados en el sistema nervioso, muscular, y óseo del cuerpo humano. Cuyo entorno de trabajo es muy demandante, por lo que el sistema buscará evitar que se necesite demasiado tiempo y atención para su uso, además debe tener conocimientos básicos sobre el uso de una computadora.

En las visitas realizadas al centro de Rehabilitación CREE Toluca y en Facultad de Medicina se pudo observar que los terapeutas cumplen diferentes funciones como son: cuidado, evaluación, rehabilitación y reintegración de los pacientes a una vida funcional.

4.2.2 Usuario Paciente

Los pacientes pueden ser personas que han sufrido alguna degeneración de la capacidad muscular de la mano por fractura, operación, enfermedad y casi cualquier persona (a reserva de la opinión del terapeuta). Que para cada uno de los dedos de la mano al menos

tenga contracción y el grupo muscular pueda conseguir el ROM completo, pero no en contra de la gravedad; lo cual corresponde a una clasificación de dos en la escala de Daniel's [43]. Es posible que los pacientes además de sus problemas físicos también presenten deterioro anímico, lo cual repercute en las actividades que deben realizar para su recuperación.

4.3 Análisis funcional

El objetivo principal que se tiene es: entregar al terapeuta la información necesaria para valorar la capacidad muscular de la mano de una persona. Para lo cual, los pacientes realizarán una prueba con duración de 60 segundos interactuando con la plataforma. A continuación, se describe como se realizará dicha interacción.

Al iniciar el sistema, se tiene un cuadro de diálogo que pide al usuario (primario-terapeuta), una clave con la cual se da acceso al sistema. De no contar con esa clave (aún no es un usuario registrado), se abre una ventana de registro de nuevos usuarios, donde registra la siguiente información: nombre, apellidos, especialidad y la clave del producto para permitir su acceso. Una vez ingresada la información, se le pide que registre una clave la cual será usada para seguir todos los movimientos que se hagan sobre el sistema, con la finalidad de llevar un control sobre que terapeuta evalúa a que paciente.

Una vez dentro del sistema, deberán existir las opciones que permitan elegir las tareas que se quieren realizar, permitiendo que el usuario mediante una serie de botones pueda elegir entre: 1) valorar a un paciente previamente dado de alta, 2) dar de alta a un paciente, y 3) obtener las evaluaciones previamente realizadas a los pacientes. Elegida una opción entonces, cada nueva sección deberá permitir al usuario desplazarse con libertad entre las pantallas de la plataforma y contar con un botón para finalizar la sesión.

Aunado a lo anterior la plataforma deberá contar con una sección en donde se muestre de manera gráfica la fuerza que el paciente ejerce con la mano durante la prueba, lo que permitirá al evaluador visualizar la fuerza ejercida en tiempo real. Además, el software, deberá contar con una sección para generar reportes, en la cual se podrá generar una gráfica con las valoraciones previas y un reporte sobre los datos requeridos; fatiga, fuerza máxima, fuerza promedio y el coeficiente de variación.

El diagrama de flujo de la plataforma se representa en la Figura 17.

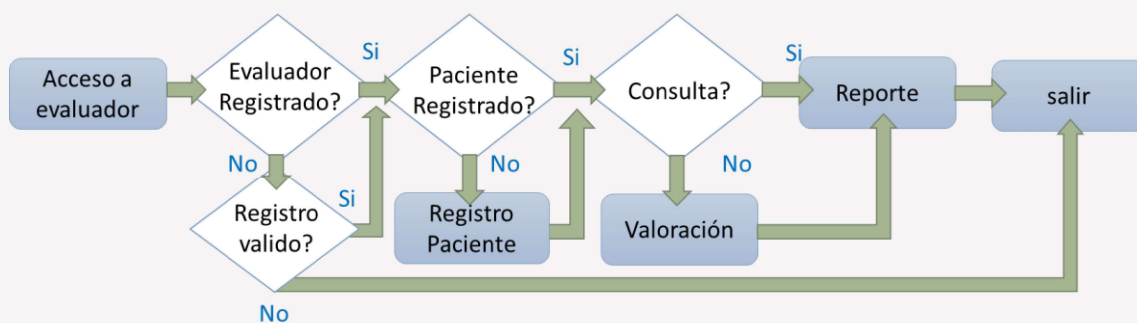


Figura 17. Diagrama de flujo para la plataforma.

4.4 Análisis de requerimientos

Para realizar la medición de la fuerza ejercida por el paciente, es necesario el uso de un sensor mediante el cual se pueda estimar o medir la fuerza además de un mecanismo que permita adaptar el sensor a la mano. La resolución del sensor debe ser de al menos 0.36 N y poder soportar un esfuerzo máximo de al menos 500 N. La señal del sensor debe ser tratada y adaptada a los voltajes de entrada del convertidor analógico digital (ADC) de un microcontrolador, preferentemente éste deberá tener por lo menos 12 bits de resolución; además el microcontrolador elegido deberá enviar la información a la computadora utilizando el protocolo de comunicaciones USB, ya que éste es el más común en las computadoras que los terapeutas tienen.

El dispositivo deberá soportar la fuerza máxima promedio que una persona sana puede ejercer con la mano para la pinza de agarre: 500 N. Sin embargo, este parámetro únicamente es definido como la resistencia máxima del dispositivo, sin que sea necesariamente el valor máximo de fuerza que se medirá, ya que para esta aplicación no es necesario ejercer tal magnitud de fuerza y los terapeutas comúnmente buscan que el paciente alcance un nivel de fuerza de 9.07 kgf o 88.9 N que determina la funcionalidad de la mano y con lo cual el paciente puede realizar las tareas básicas necesarias para ser independiente (actividades de la vida diaria) [11].

Los siguientes requerimientos necesarios que debe cumplir la plataforma para valorar la capacidad muscular según [2] son:

- **Fuerza máxima:** el valor máximo medido que se puede ejercer con la mano en una pinza de agarre en posición recomendada por la Asociación Americana de Terapeutas de la Mano (ASHT por su acrónimo en inglés), considerando que el ángulo de la muñeca con el que se obtiene mayor fuerza es el elegido por el paciente como se explica en [44].
- **Fuerza Promedio:** el promedio del valor de la fuerza que una persona puede ejercer con una pinza de agarre por un lapso de 60 segundos.
- **Coefficiente de variación:** valor que hace referencia a la relación del tamaño de la medida y la variabilidad de la señal, el coeficiente de variación se calcula mediante la Ecuación 1.

$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \quad (1)$$

Donde:

- σ Es la desviación típica
 - \bar{x} Es la Media
- **Índice de Fatiga:** El índice de fatiga indica cual es el porcentaje de disminución de la fuerza, para obtenerlo es necesario realizar una prueba de fuerza isométrica sostenida durante 60 segundos y se obtiene el promedio de la fuerza ejercida durante los tres primeros segundos y los tres últimos segundos de la prueba y aplicar la Ecuación 2.

$$If = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_{max}} 100 \quad (2)$$

Donde

F_{max} Es el valor de la fuerza máxima medida

F_{min} Es el valor de la fuerza medido al final de la prueba

El ancho de banda del cuerpo humano es de 15 Hz [22], aunque, se ha comprobado que existen componentes frecuenciales de hasta 60 Hz. A pesar de que las pruebas de valoración de fuerza de mano no requieren de un rango de trabajo tan amplio, la plataforma adquirirá una señal con una frecuencia menor o igual a 60 Hz, filtrándola con filtro antialias RC de primer orden. La frecuencia de muestreo del dispositivo será de 100 Hz, ya que con esa frecuencia es suficiente para cumplir el criterio de Nyquist en el para el ancho de banda del cuerpo humano.

La interfaz gráfica estará diseñada de tal forma que su uso requiera de una mínima carga mental posible. Solo contará con los elementos mínimos necesarios, todo aquello que se pueda realizar de manera automática, se realizará. Evitando que el usuario tenga que realizar cálculos u operaciones innecesarias para el proceso de valoración.

El software permitirá almacenar la información sobre las pruebas realizadas en diferentes sesiones, así como la información sobre los evaluadores y los pacientes. Para poder realizar un análisis posterior y para llevar un control sobre las personas evaluadas.

4.5 Criterios de evaluación.

Para evaluar a la plataforma se propone utilizar las heurísticas propuestas por Jacob Nielsen descritas en la sección 2.5. La plataforma se divide en tres partes:

- **El Mango Instrumentado:** Compuesto básicamente por el dispositivo que acopla el sensor de fuerza a la mano.
- **El módulo de Comunicación:** Es el elemento que nos permite obtener la información del sensor que se encuentra en el mango instrumentado, realiza un tratamiento de la señal y finalmente envía la información obtenida del sensor a la computadora.
- **El software de evaluación:** Es la parte del software que está compuesto por todas las funciones que son usadas en el computador por el evaluador para obtener la información y estadística de los datos que se obtengan mediante el mango y el módulo de comunicación.

Cada una de las partes que componen la plataforma están diseñadas para que cumplan con su tarea y con la mayoría de las heurísticas de Nielsen.

4.6 Primera Iteración

4.6.1 Diseño

En la primera iteración, para la medición de la fuerza de la mano se propuso utilizar una pelota, a la cual le fueron empotrados sensores Flexiforce. Estos sensores basan su funcionamiento en el cambio de resistencia provocado por la fuerza que se ejerce de

manera perpendicular sobre la superficie activa del sensor [45], el sensor se muestra en la Figura 18. Este principio se pudo aprovechar para medir la fuerza de cada uno de los dedos de la mano, es importante resaltar que el sistema de medición de fuerza ya se encontraba calibrado y probado, ya que el resultado de la investigación realizada en el Instituto Tecnológico de Orizaba [46].

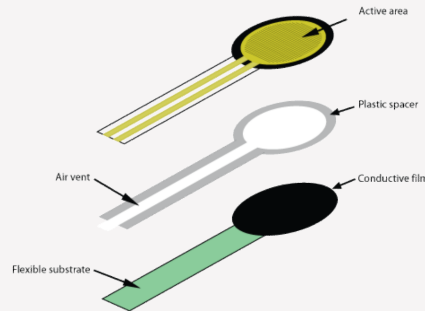


Figura 18. Sensor Flexiforce

Para la valoración y visualización de la fuerza ejercida sobre la pelota se diseñó un videojuego que mediante una barra indicaba la fuerza ejercida.

4.6.2 Prototipado

Los sensores fueron distribuidos en la pelota de tal forma que pudiera captar la fuerza ejercida por cada uno de los dedos de la mano y de esta forma obtener la fuerza de agarre y enviarla a una computadora para ser usada por la interfaz. La dinámica del juego consiste en que el paciente toma el papel de una planta carnívora que se enfrenta a unos zombis y tiene que devorarlos presionando la pelota y así la planta comience a masticar y mientras más fuerte y más rápido la pelota sea presionada, el zombi será devorado con mayor rapidez. Además, se incluyen unas barras que representan la “vida” de cada uno de los personajes.

En la Figura 19 se muestra la interfaz gráfica que se diseñó para esta primera propuesta y el módulo de comunicación.



Figura 19. Interfaz gráfica y módulo de comunicación primera iteración.

4.6.3 Pruebas

4.6.3.1 Evaluación Heurística

Como se ha mencionado anteriormente, las pruebas de usabilidad se realizan para obtener información sobre un producto que está en desarrollo, con el objetivo de evaluar que tan usable es y saber si cumple con la funcionalidad requerida para su implementación. Uno de los objetivos de dichas pruebas es obtener datos cuantitativos midiendo el tiempo de aprendizaje, número de errores, tiempo de ejecución, etc. También se pueden obtener datos cualitativos sobre la satisfacción del usuario con el dispositivo; estos se obtienen mediante cuestionarios, comentarios, o entrevistas realizadas a los usuarios. Se ha comprobado que las pruebas de usabilidad reducen el tiempo de desarrollo, el número de errores, y los gastos de soporte técnico.

Los dos tipos de pruebas más comunes son las pruebas de experiencia de usuario y las pruebas con expertos, conocida como evaluación heurística.

A continuación, se muestra una tabla, resultado de la evaluación de las heurísticas de Nielsen aplicadas al primer prototipo de la plataforma de evaluación de fuerza de la mano.

Heurística a evaluar	Pelota	Módulo de Comunicación	Software
Visibilidad del estado del sistema	N/A	No. no informa al usuario de la conexión del sistema	No. El sistema muestra lo contrario a las acciones del usuario
Relación entre el sistema y el mundo real	No cumple	No	No
Control y libertad del usuario	No cumple, requiere una posición específica	N/A	No. No se tiene menú para analizar la información
Consistencia y estándares	Si. La pelota es un sistema que se usa para rehabilitación	Si. Sistemas un tanto obsoleto, pero cumple	No. La interfaz muestra lo contrario
Prevención de errores	Cuenta con marcas, pero no evita que se use de forma incorrecta	N/A	No. Requiere configuración de puerto COM
Reconocimiento antes que recuerdo	Si. Las marcas ayudan al usuario a reconocer la posición de agarre	No. No cuenta con guías visuales	N/A
Flexibilidad y eficiencia de uso	Si. La pelota puede ser usada para rehabilitación y para medir fuerza	N/A	N/A
Estética y diseño minimalista	Si. Requiere de solo 5 componentes	No. Sistema bastante robusto y complejo	N/A
Ayudar a los usuarios a reconocer	Si. La pelota cuenta con marcas y guías visuales	N/A	N/A
Ayuda y documentación	No. No contaba con Manual	No. No contaba con Manual	No. No contaba con Manual

Tabla 2. Resultado de la evaluación de las métricas de Nielsen al primer prototipo de la plataforma de fuerzas.

4.6.3.2 Evaluación por parte de los usuarios

El primer prototipo de la plataforma fue presentado y puesto a prueba con terapeutas del CREE. De esta primera propuesta surgieron varias observaciones por parte de los especialistas en rehabilitación. La principal observación fue una inconsistencia en las actividades a realizar, ya que el sistema estaba diseñado para presionar una pelota; sin embargo, gráficamente al presionar la pelota, la planta carnívora abría la boca y esto ocasionaba un problema tanto en la consistencia como en la coherencia de la plataforma incurriendo en errores de usabilidad.

También se sugirieron realizar cambios a la interfaz gráfica, ya que fue necesario evitar la representación numérica por una representación gráfica que esté basada en la escala de Daniel's, más que en una escala en Newtons. A pesar de que esto pueda aumentar la precisión, para el usuario demandaba más atención. Sin embargo, los usuarios comentaron que podían obtener mejores resultados con un entorno gráfico basado en una escala discreta y subjetiva que proporcione información objetiva y que muestre informes de ser necesario.

El primer prototipo mostraba inconsistencia en las lecturas debidas a los sensores fuerza ya que es imperativo que la fuerza sea ejercida por cada dedo sea puntual pues como se menciona en [45] existe una variación significativa por la configuración del hardware, lo cual es complicado de resolver tal y como está diseñado el primer prototipo pues no podemos asegurar que todos los usuarios sujeten el dispositivo exactamente de la misma forma cada vez que se hace una prueba, aunado a los problemas que los sensores tienen debido al cambio de resistencia por la humedad.

Se determinó entonces, cambiar el sensor por uno que resista humedad, que no tenga problemas que afecten la lectura de la fuerza ejercida y que no requiera de una fuerza puntual ya que eso limita el tamaño de mano.

4.7 Segunda Iteración

4.7.1 Diseño

Debido a las limitaciones de los sensores de fuerza utilizados en el primer prototipo, el segundo prototipo se basó en la utilización de sensores de efecto Hall [47], éstos tienen la capacidad de detectar campos magnéticos y ser inmunes a la humedad. El diseño consideraba la instrumentación de unas pinzas regulables.

En cuanto al módulo de comunicación de la plataforma se utilizó la comunicación USB CDC, la cual simula virtualmente un puerto serial en una conexión USB. Evitando así el uso de un puerto serial físico o en su defecto un convertidor USB-serial, el cual era utilizado en el primer prototipo.

Se realizaron cambios en la interfaz visual, para ello se eliminan elementos innecesarios mostrados en la versión anterior, los cuales demandaban más atención de la necesaria, así que se diseñó una interfaz más simple que evitara el problema de coherencia que se acentuaba en la versión anterior.

4.7.2 Prototipado

Las pinzas regulables tienen por objetivo evitar el uso de sensores de fuerza independientes, eliminando la necesidad de ejercer una fuerza puntual sobre cada uno de ellos. Por el contrario, para esta propuesta se obtenía la fuerza total ejercida por la mano en una pinza de agarre que es lo que se desea medir. La instrumentación de la pinza se realizó colocando un sensor en una parte móvil de la pinza y en la otra parte un imán que induce el campo magnético, mediante el cual se estima la fuerza de agarre ejercida. El concepto del segundo prototipo se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Pinzas de Agarre para la segunda iteración

Se realizaron pruebas con los sensores, midiendo la respuesta del sensor cuando éste se sometía al efecto del campo magnético de un imán y mediante el movimiento de las pinzas se estimaba el valor de la fuerza ejercida; se realizaron pruebas colocando el sensor y el imán en la punta de un calibrador vernier con la finalidad de caracterizar el sensor como se muestra en la Figura 21.



Figura 21. Pruebas para la caracterización del sensor

El diseño del módulo de comunicación se cambió por uno de menor dimensiones, además aprovechando la capacidad del protocolo USB para proveer hasta 500 mA de corriente, suficiente para alimentar a los circuitos del hardware de la plataforma, evitando así, una fuente de voltaje externa, reduciendo considerablemente el peso (de 2 kg a 200 g) y el tamaño (de 28x13x9 cm a 7x5x1.9 cm) en el primer y segundo prototipo respectivamente. El material del cual está hecha la carcasa del hardware de la plataforma es de Nylamid, el cual es más resistente que el acrílico. Internamente el módulo de comunicación cuenta con un microcontrolador que lee la señal analógica de voltaje del sensor de efecto Hall. El módulo se presenta en la Figura 22.



Figura 22. Módulo de Comunicación

La interfaz gráfica se modificó eliminando los componentes innecesarios y el problema de coherencia. La dinámica de interacción entre la interfaz y paciente es la siguiente: el paciente toma el control de una pelota y cuando presiona las pinzas, la pelota se eleva, regresando ésta a su posición inicial cuando se deja de aplicar fuerza a las pinzas, de tal forma que el usuario debe evitar chocar con los obstáculos que se le van presentando. El diseño de la Interfaz se muestra en la Figura 23.

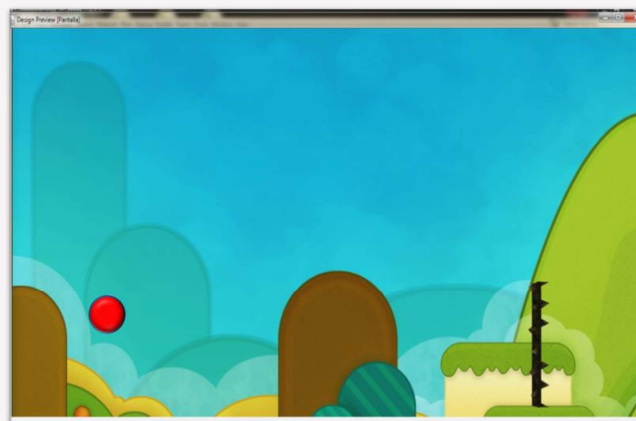


Figura 23. Interfaz gráfica Segunda iteración.

4.7.3 Pruebas

4.7.3.1 Evaluación heurística

La evaluación de esta segunda iteración fue únicamente con las heurísticas debido a que seguía sin cumplir con los objetivos planteados y las necesidades de los terapeutas.

Debido a que la plataforma aún presentaba errores y seguía sin cumplir cabalmente las necesidades de los terapeutas, las pruebas con usuarios se omitieron en esta ocasión y se procedió a una tercera iteración del prototipo.

Heurística a evaluar	Pinzas	Módulo de Comunicación	Software
Visibilidad del estado del sistema	N/A	No. No informa al usuario de la conexión del sistema	No
Relación entre el sistema y el mundo real	No cumple	No	No
Control y libertad del usuario	N/A	N/A	No. No se tiene menú para analizar la información
Consistencia y estándares	No. La pelota se desplaza en un eje diferente	Si, USB	No. La interfaz sigue sin ser consistente
Prevención de errores	Cuenta con marcas, pero no evita que se use de forma incorrecta	N/A	No. Sigue necesitando la configuración del puerto COM
Reconocimiento antes que recuerdo	Si. Las marcas ayudan al usuario a reconocer la posición de agarre	No. No cuenta con guías visuales	N/A
Flexibilidad y eficiencia de uso	Si. Las pinzas pueden medir la fuerza y ejercitar los músculos	N/A	N/A
Estética y diseño minimalista	No. Requiere de un resorte y piezas con movimiento	Si. Diseño simple, solo dos conexiones, sensor y computador	N/A
Ayudar a los usuarios a reconocer	Si. Las pinzas cuentan con marcas	N/A	N/A
Ayuda y documentación	No. No contaba con Manual	No. No contaba con Manual	No. No contaba con Manual

Tabla 3. Resultado de la evaluación de las métricas de Nielsen al segundo prototipo de la plataforma de fuerzas.

4.8 Tercera Iteración

4.8.1 Diseño

En el segundo prototipo, uno de los problemas que se encontraron durante la aplicación de las heurísticas fue el hecho de que los sensores de efecto Hall necesitan una posición muy precisa para medir correctamente el campo magnético y asegurar que eso se cumpla utilizando unas pinzas es muy complicado. Éstas requieren de una holgura para poder funcionar, además que el mecanismo sufre desgaste, por lo que se buscaron otro tipo de sensores y mecanismos. El mecanismo final no debería tener piezas que tengan movimiento, pues eso aumenta la probabilidad de falla y la necesidad de mantenimiento.

La solución que se propuso a las problemáticas anteriores fue usar celdas de carga empotrándolas en un mango. Las celdas de carga son transductores que convierte fuerza en una salida eléctrica medible, tienen un mínimo efecto drifting, el cual es despreciable para nuestros fines.

La interfaz gráfica se cambió buscando evitar los errores en la consistencia y coherencia de la interacción con la plataforma, teniendo la capacidad de almacenar la información requerida por los terapeutas para llevar el control de los pacientes.

4.8.2 Prototipado

4.8.2.1 Sensor de fuerza

Las celdas de carga son sensores que sirven para medir deformaciones o esfuerzo mecánico al que se somete una estructura metálica, para tal efecto se coloca sobre una estructura metálica un circuito que consiste en un material conductor cuya resistencia según la literatura [48], está determinada por la ecuación (3).

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (3)$$

Donde:

R=resistencia

P= resistividad del material

l =longitud

S=área transversal

Al ser sometido el material a una deformación su resistencia se ve afectada quedando determinado por la ecuación (4).

$$R + \Delta R = \frac{\rho l + \Delta l}{S + \Delta S} \quad (4)$$

La celda de carga elegida consta de 4 celdas extensiométricas, cada una de ellas es altamente repetible, tiene un coeficiente de correlación lineal $r = 0.97$, un grado de protección IP56 que en referencia al estándar internacional IEC 60529 que avala que cada celda es capaz de soportar chorros de agua, lo que asegura que soporta la humedad. En la Figura 24 se muestra la celda de carga YZC-1B con capacidad de 40 kg que se utilizó en esta investigación.

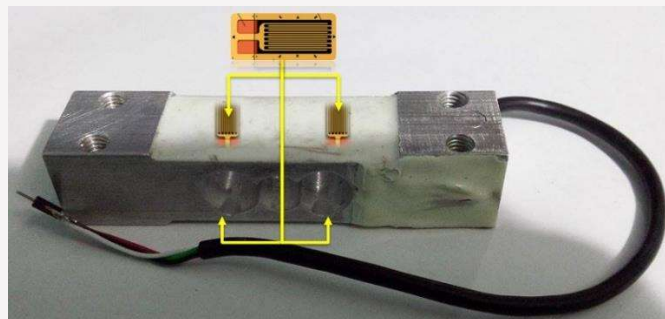


Figura 24. Celda de Carga

Esta celda de carga está compuesta de cuatro galgas extensiométricas en un arreglo de puente de Wheatstone [48] y con compensación por temperatura, que nos permite mantener lecturas repetibles en un rango de temperatura que va de 3 a 50°C el diagrama

de la conexión interna de la celda de carga, así como el arreglo para calibrar la celda de carga, el cual es mostrado en la Figura 25.

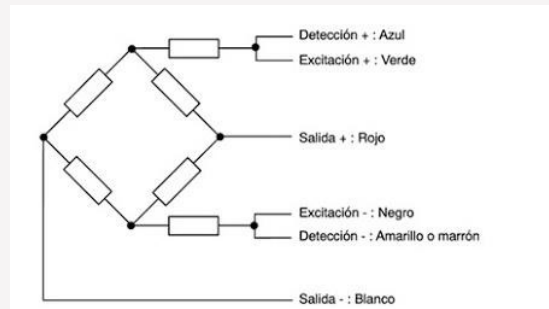


Figura 25. Diagrama interno

La celda de carga tiene la forma y medidas mostrada en la Figura 26.

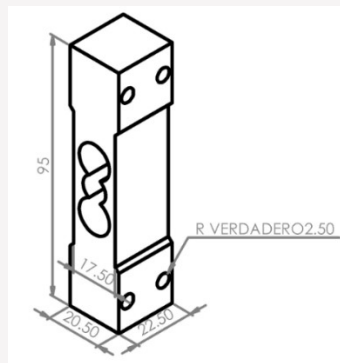


Figura 26. Celda de carga

El diseño del mango donde la celda fue encapsulada, consiste en dos bases semicirculares separadas por la celda de carga logrando una separación de 5 cm distancia. Para ensamblar las piezas se usaron tornillos 5M y pegamento Loctite 495; en la Figura 27 se muestra el ensamble de esta versión.



Figura 27. Mango Instrumentado tercera Iteración

Se buscó no incluir las molduras de los dedos, según la literatura de ergonomía, esto limitaría el dispositivo a ser compatible con un único tamaño de mano. Para poder asegurar que el mango efectivamente es capaz de obtener la fuerza máxima de la mano

de los usuarios se consideraron las recomendaciones de la forma que debe tener un mango [49].

4.8.2.2 El módulo de comunicación

Se diseño un circuito al cual se le denomino modulo de comunicación, el cual está compuesto de diferentes etapas. En la primera de ellas, la señal diferencial proveniente del puente de Wheatstone de la celda de carga se acopla a un circuito para alimentarlo con 5 volts y calibrarlo usando un potenciómetro de 100 k Ω ; despues, la señal calibrada, pasa por un amplificador de instrumentacion con una ganancia de $G=250$ y un rechazo de modo común de 130 dB. Los amplificadores de intrumentacion estan compuestos por tres amplificadores operacionales en un arreglo como el mostrado en la Figura 28.

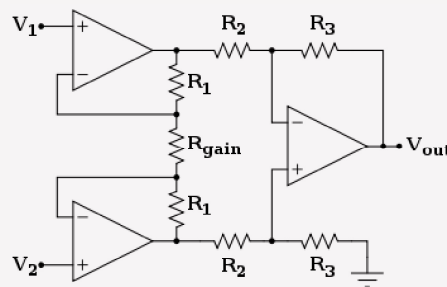


Figura 28. Diagrama de amplificador de Instrumentación.

De la Figura 28, se puede observar que la ganancia de un amplificador de instrumentacion es controlada unicamente con una resistencia R_{gain} y el voltaje de salida esta determinado por la Ecuacion 5.

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}} \right) \left(\frac{R_3}{R_2} \right) \quad (5)$$

El circuito AD620 es el integrado que encapsula el amplificador de instrumentación y es el usado para amplificar la señal del mango instrumentado, el diagrama se muestra en la Figura 29.

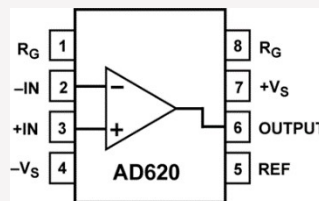


Figura 29. Diagrama AD620

El amplificador de intrumentación tiene voltajes de saturacion V_- y V_+ de 0.7 y 4.3 volts respectivamente. La salida del amplificador de intrumentacion fue filtrada por un circuito RC anti alias pasabajas con una frecuencia de corte de de 60 Hz y una atenuacion de 6

dB por octava fuera de la frecuencia de corte. En la Figura 30, se muestra el diagrama de un filtro RC.

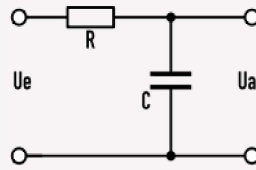


Figura 30. Filtro RC de primer orden

Se entiende como frecuencia de corte a el punto en el que la impedancia del capacitor Z_c es igual a la resistencia, por lo que la frecuencia de corte f_c está determinada por la Ecuación 6.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6)$$

Por lo que los valores de los elementos quedaron de la siguiente forma

$C=10 \mu f$

$R=265$ (270 valor comercial)

$F_c= 58.9 \text{ Hz}$

Las señal de salida filtrada es enviada a un microcontrolador PIC18F2458, el cual fue elegido gracias al numero de pines ya que cuenta con un ADC interno de 12 bits capaz de discretizar la señal de entrada en los rangos de trabajo necesarios para la aplicación. Los voltajes de referencia positivos y negativos del ADC corresponden a los voltajes de saturación del amplificador de instrumentación, lo cual nos lleva a tener una resolución de 9.8 gf, resolución que es mejor que la mínima necesaria para medir variaciones de fuerza controlable de las manos 36.7 gf [50].

4.8.2.2.1 Microcontrolador

Los pines fueron configurados de la siguiente forma:

Pin RB0: Configurado como entrada para recibir la señal de conexión del mango instrumentado y saber que esta listo para trabajar.

Pines RB1, B2 yB3: Configurados como salida y están conectados a un led RGB el cual tiene la posibilidad de iluminar el modulo de comunicación de diferentes colores según el estatus del sistema.

Pin RB4: Configurada como salida y va conectada a un led montado en el mango instrumentado que se iluminara indicando el momento en el cual se esta obteniendo la lectura de la fuerza.

Pin RA0/AN0: Configurado como entrada analogica para realizar la lectura de la señal proveniente del amplificador de instrumentación correspondiente a la celda de carga

El diagrama eléctrico se muestra en el **Apéndice A**.

La comunicación con la computadora se realiza mediante el módulo USB 2.0 (en formato CDC Communications Devices Class), el cual simula un puerto serial de forma virtual.

El programa del microcontrolador espera a que llegue un carácter “i” en código ASCII al puerto USB lo cual indicaría que se está solicitando, desde la computadora, realizar una prueba, entonces el programa activa el led verde colocado en el mango instrumentado para informar al paciente que se ha iniciado una prueba, la cual técnicamente consiste en realizar lecturas del canal AN0 y enviar las a la computadora a intervalos de 10 ms en una trama de datos con el formato mostrado en la Figura 31.



Figura 31. Trama del Módulo de Comunicación

La petición de información es enviada desde una aplicación en la computadora, la cual tiene un hilo independiente que corre a una frecuencia de 100 Hz. Esto se comprueba de la siguiente manera; se envía un pulso al pin RB4 una vez que el ciclo de envío y recepción de información se ha completado, lo cual se puede validar a través de la gráfica mostrada en la Figura 32, donde se puede apreciar que la información se envía a intervalos de 10 ms.

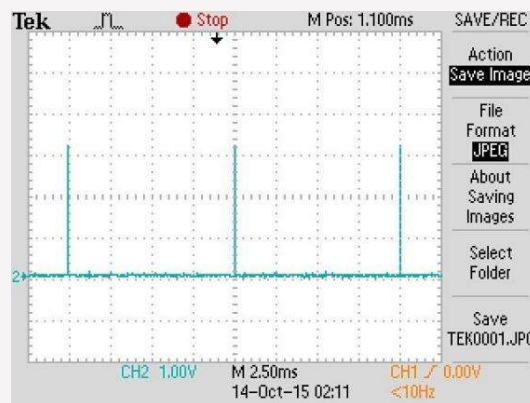


Figura 32. Lectura del Osciloscopio.

El circuito se colocó dentro de una caja de 40 mm x 60 mm x 18 mm construida en acetal, un material de grado farmacéutico, que debido al bajo nivel de porosidad evita que se acumule mugre y bacterias. El color del material se eligió blanco ya que es translucido y funciona como pantalla para proyectar la luz de los leds del circuito; además, el color blanco transmite la idea de limpieza. La finalidad de que sea de un tono opaco es evitar que el circuito sea visible. La caja únicamente tiene dos entradas, una para el puerto USB

que se conectara a la computadora y la otra para el conector del cable plano que se conecta al mango instrumentado. El módulo de comunicación se puede ver en la Figura 33, los planos se encuentran en el **Apéndice B**.

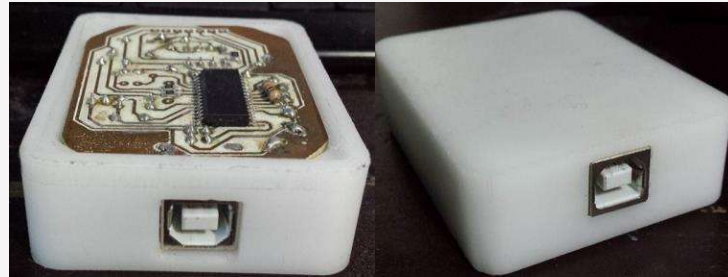


Figura 33. Módulo de comunicación

En conjunto, la plataforma, en adelante denominada Plataforma para la Valoración de la Capacidad Muscular de la Mano (PVCMM), se puede representar mediante el diagrama de la Figura 34.

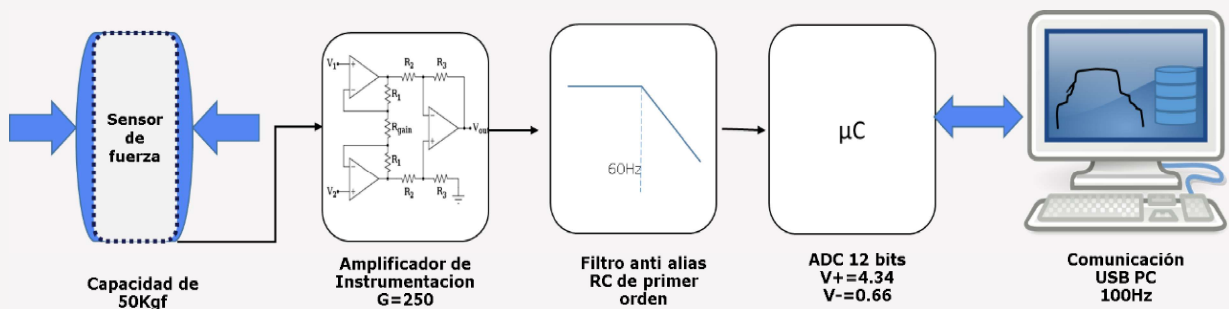


Figura 34. Diagrama de bloques de la PVCMM.

4.8.2.2.2 Led RGB

El módulo cuenta con un led RGB que permite dar información sobre cuál es el estatus actual de la plataforma. Buscando que esto ayude al usuario evaluador a saber cuál es el estatus del sistema y si existe un error que impida realizar una lectura correcta, o un mal funcionamiento del sistema. Los colores en que el módulo de comunicación puede iluminarse se detallan en la Tabla 4.

Led	Estatus del sistema
Apagado	El sistema actualmente se encuentra desconectado
Rojo	El sistema se encuentra conectado sin comunicación con la computadora
Amarillo	Sistema conectado y con comunicación a la computadora
Verde	El sistema está conectado a la computadora y con el sensor
Azul	El sistema está realizando una lectura

Tabla 4. Color del módulo y estatus del sistema que representa.

Estos colores ayudan a que el sistema pueda comunicarle al usuario el estatus del sistema; por ejemplo, si el sistema está listo para realizar una prueba o presenta alguna anomalía, y en caso de ser así, el mismo sistema le permita solucionar los problemas que se le puedan presentar. Además, se han considerado mecanismos a prueba de errores que ayudaran al usuario en la conexión y uso de la plataforma.

4.8.2.4 Software

Se diseñó una aplicación en la computadora usando lenguaje Java y las librerías Javax, que permiten acceder a los puertos serial y así poder enviar y recibir datos de los puertos virtuales COM. El programa cuenta con un hilo para gestionar el envío de los datos de la computadora hacia el módulo de comunicación a una frecuencia de 100 Hz, dichos datos son únicamente los caracteres “i” y “0” los cuales le indican al módulo de comunicación si debe realizar una lectura o debe seguir en modo de espera. Los datos enviados del módulo de comunicación son recibidos por la computadora; si el primer dato corresponde al encabezado entonces se leen seis bytes del buffer y se desempaquetan en tres variables diferentes F, E y C las cuales corresponden a la *Fuerza leída*, *Estado del dispositivo* y el *Checksum*, éste último verifica si los datos leídos no están corrompidos, para ello se suman ambas variables F y E y se comparan con C; en caso de ser iguales se toma el dato de la fuerza como un dato válido y se almacena en la base de datos, de lo contrario el dato se desecha y se espera al siguiente paquete.

Para ayudar a que los evaluadores puedan instalar el software en cualquier computadora, pero sobretodo que puedan configurarlo por sí mismos; el programa hecho en Java, la base de datos y las librerías necesarias para su funcionamiento, fueron empaquetadas en un instalador titulado PVCMM usando el software Inno Setup, que nos permite empaquetar todo en un archivo .exe para su instalación.

El archivo PVCMM.exe se guardó en el directorio de raíz de una memoria USB, al cual el usuario debe dirigirse para instalación, Figura 35.

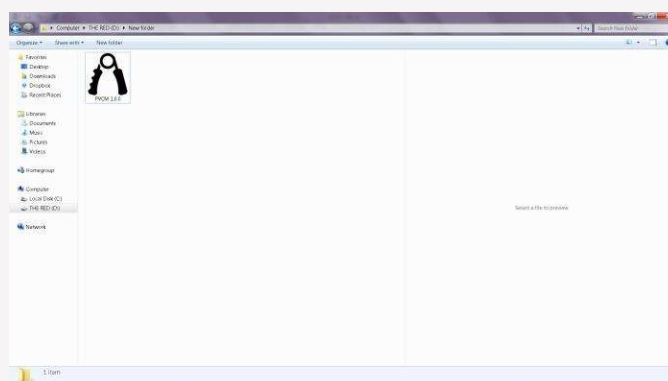


Figura 35. Icono PVCMM

El usuario deberá seleccionar el archivo PVCMM.exe y ejecutarlo dando doble click en el archivo, y cuando el sistema operativo le pida autorización para instalar el software dar click en el botón “Aceptar”, “Yes” según la versión de Windows instalada en la computadora, Figura 36.

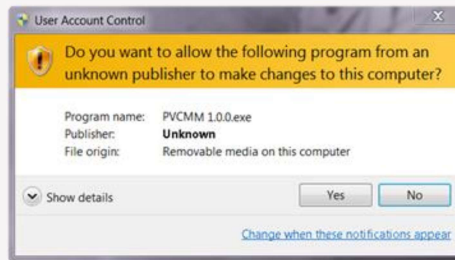


Figura 36. Pantalla Autorización.

Después de dar click en el botón aceptar, se abrirá un cuadro de diálogo en el que se informa sobre el archivo que se instalará, para avanzar en la instalación deberá presionar el botón “Siguiente”, Figura 37.



Figura 37. Pantalla Setup PVCMM

En el cuadro de diálogo de la Figura 38 se informa al usuario en donde se instalarán los accesos directos al programa PVCMM, los cuales pueden ser configurados presionando el botón “Examinar”, una vez seleccionada la ruta entonces se presiona el botón “Siguiente” para avanzar en la instalación.

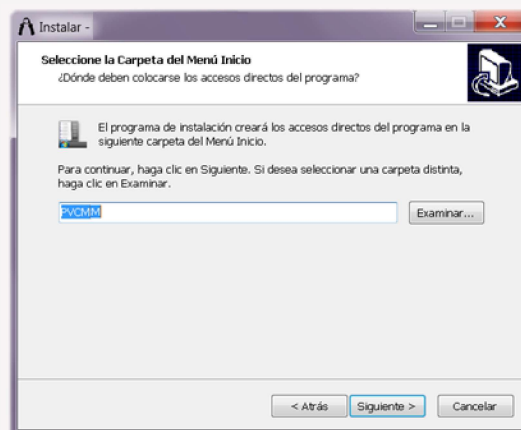


Figura 38. Pantalla accesos directos

Una vez presionado el botón “Siguiente” entonces podrá elegir crear un icono de acceso directo en el escritorio marcando la casilla “Crear acceso directo en el escritorio”. Se debe presionar el botón “Siguiente” para continuar con la instalación, la pantalla se muestra en la Figura 39.



Figura 39. Pantalla Crear Icono en el escritorio

En la siguiente pantalla, Figura 40, se informa al usuario sobre la configuración final del programa. Si así lo desea, puede regresar y cambiar la configuración presionando el botón “Atrás” o puede instalar el programa con la configuración actual presionando el botón “Instalar”. Tomando en cuenta que una vez instalado el programa, la única manera de realizar cambios será desinstalando el programa y volver a instalarlo.

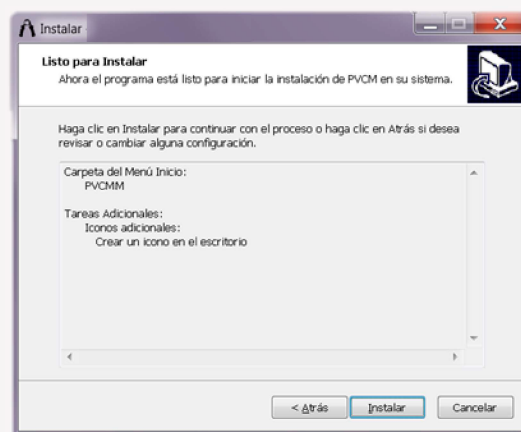


Figura 40. Resumen de Instalación

Una vez presionado el botón “Instalar” entonces el programa comienza con la instalación. Este paso tiene una duración aproximada de 5 minutos.

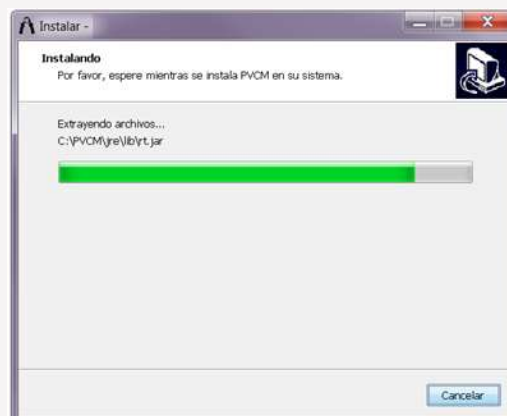


Figura 41. instalación en proceso

Para finalizar con la instalación, el usuario puede elegir ejecutar el programa o simplemente cerrar la pantalla.

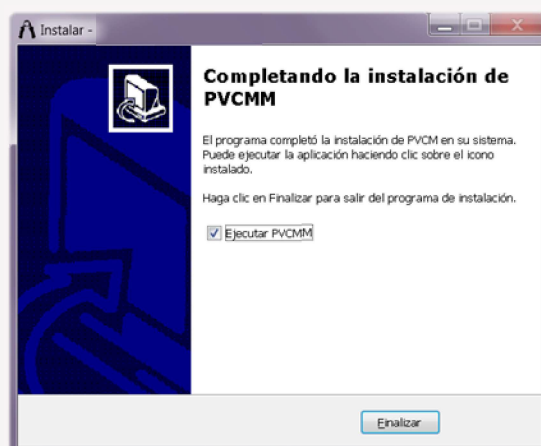


Figura 42. instalación Finalizada

Al ejecutar el programa, éste realiza una consulta a la *Tabla Evaluadores* y en caso de estar vacía (lo que indicaría que es la primera vez que se usa el software); se abrirá un cuadro de dialogo llamado “Registro de evaluador”. En esta pantalla el usuario podrá darse de alta como un evaluador, para lo cual se requieren los datos que se muestran en la Tabla 5.

Descripción	Tipo de dato
Nombre	Varchar (30)
Apellido paterno	Varchar (30)
Apellido materno	Varchar (30)
Especialidad	Varchar (30)
Edad	Smallint
Sexo	Tinyint (1)
Clave de acceso	Varchar (8)
Código de seguridad	1XPAVCM

Tabla 5. *Tabla Evaluadores*

Varchar es un tipo de dato que permite almacenar registros con longitud variable. Si el valor guardado es menor al valor máximo permitido y en caso de exceder la longitud máxima, los datos son truncados. Esto significa que, si una persona ingresa un nombre con 5 letras, la longitud del dato será únicamente de 6 Bytes, 5 Bytes para el nombre y uno para indicar la longitud del dato almacenado.

El **Código de seguridad** es un código que está programado como una constante. La utilidad de este código es que únicamente el usuario que tenga el manual es quien podrá dar de alta a más evaluadores, evitando que cualquier persona tenga acceso a los datos de los pacientes.

La pantalla **Registro de Evaluador** se muestra en la Figura 43. Una vez que el usuario ingrese la información requerida, deberá presionar el botón “Registrar”. Si los datos están incompletos o no están escritos en el formato mencionado en la Tabla 5, entonces se desplegará un cuadro de diálogo que indicara cual es el error y lo regresara a la pantalla

para corregir los datos. Una vez que el usuario ingresa la información de manera correcta, sus datos serán guardados en la base de datos.

Figura 43. Pantalla Registro de Evaluador

Completado lo anterior se abre una nueva pantalla con el título “*Inicio de sesión*” en esta pantalla (Figura 47) el usuario cuenta las siguientes opciones:

- Icono de ayuda: cuando el usuario arrastra el puntero del ratón sobre este icono se muestra un cuadro de dialogo con información detallada sobre las acciones de cada botón.
- Clave de acceso: Cuadro de texto que permite escribir una clave de acceso de un usuario previamente registrado. Al presionar la tecla, el software realiza una consulta a la tabla evaluadores para comparar con la clave de acceso, en caso de existir una coincidencia se toma los datos del evaluador asociado a esa clave.
- Entrar: al presionar este botón el software realiza una consulta a la tabla evaluadores para comparar con la clave de acceso, en caso de existir una coincidencia se toma los datos del evaluador asociado a esa clave y se pasa a la pantalla de menú principal.
- No estoy registrado: Al presionar este botón se abrirá la pantalla “Registro de evaluador”, en donde el usuario podrá registrarse.
- Salir: al presionar este botón el sistema se cerrará.

En la Figura 44 se muestra la pantalla de Inicio de sesión.

Figura 44. Pantalla Inicio de sesión.

Una vez que un evaluador ingresa con una cuenta valida, el sistema abre otra pantalla llamada “Menú”, en la cual el usuario cuenta con las siguientes opciones:

- Icono de ayuda: Cuando el usuario arrastra el puntero del mouse sobre este icono se muestra un cuadro de dialogo con información detallada sobre las acciones de cada botón una de las opciones.
- Registrar a un paciente: Al presionar este botón se abre una pantalla “Registro de pacientes” en la cual el usuario deberá registrar a los pacientes que serán valorados.
- Realizar una valoración: Al presionar este botón se abre una pantalla “Prueba de Fuerza para paciente” en la cual el evaluador podrá realizar una prueba de fuerza para obtener los datos necesarios para su valoración.
- Analizar datos: Al presionar este botón aparecerá un cuadro de diálogo pidiendo la cuenta de un paciente, al ingresarla, el evaluador podrá acceder a una pantalla llamada “Análisis de datos”, en la cual se muestran las gráficas y los resultados de las pruebas realizadas previamente.
- Salir: al presionar este botón el sistema se cerrará.

En la Figura 45 se muestra la pantalla de “Menú”

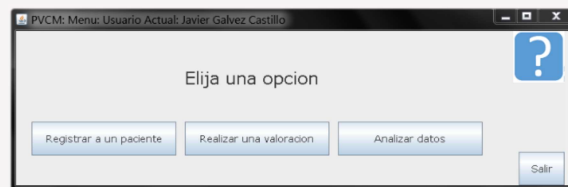


Figura 45. Pantalla Menú

Al presionar el botón “Registro de pacientes” se abre una pantalla con el mismo nombre en la cual el evaluador podrá registrar a los pacientes que serán valorados para lo cual se deberán registrar los datos mostrados en la Tabla 6.

Descripción	Tipo de dato
Nombre	Varchar (30)
Apellido paterno	Varchar (30)
Apellido materno	Varchar (30)
Edad	Smallint
Estatura	Float
Peso	Float
Clave de registro	Varchar (20)
Sexo	Tinyint (1)

Tabla 6. Tabla Paciente

La pantalla se muestra en la Figura 46. Una vez que el evaluador ingrese la información requerida, deberá presionar el botón “Registrar”. Si los datos están incompletos o no están escritos en el formato mencionado en la Tabla 6, entonces se desplegará un cuadro de diálogo que indicara cual es el error y lo regresara a la pantalla para corregir los datos. Una vez que el usuario ingresa los datos de manera correcta, éstos serán guardados en la base de datos. Al presionar “Cancelar”, el sistema cierra la pantalla “Registro de pacientes” y regresa a la pantalla “Menú”.

Figura 46. pantalla Registro de Pacientes.

Al presionar el botón “Realizar una valoración”, un cuadro de dialogo pedirá que se ingrese la clave del paciente que desea evaluar, al ingresar una clave y presionar la tecla “Enter”. El sistema realizara una consulta para obtener toda la información del paciente. En caso de no encontrar paciente con esa clave, el sistema le indicara al evaluador ingresar una clave valida.

Una vez ingresada una clave de paciente valida se abre una pantalla llamada “Prueba de Fuerza para el Usuario”, en esta pantalla el usuario cuenta con las siguientes opciones:

- Icono de ayuda: el icono de ayuda solo estará disponible mientras no se esté realizando una prueba de fuerza y en él se muestra información detallada sobre cada una de las opciones de esta pantalla.
- Iniciar Prueba: Al presionar este botón, se establece la comunicación con el mango instrumentado mandando la orden de que éste se ilumine de color verde para indicar que se está realizando una lectura. El botón cambia de color a un color verde más intenso y se inicia un hilo llamado *actualizar* con una frecuencia de 37 Hz. Ésta es definida por el número de pixeles que se dibujan en la gráfica por cada actualización y por ser superior a la frecuencia en la cual el ojo percibe un movimiento como continuo. Este hilo se encarga de graficar el ultimo valor que se agregó al vector “Valoración” donde se almacenan todos los datos que se obtienen del módulo de comunicación.
- Prueba Dinámica: al hacer clic sobre el *check box*, se habilita la opción para realizar una prueba dinámica que hará que el led que se encuentra en el mango instrumentado prenda y se apague a intervalos de tres y cinco segundos respectivamente. Con la finalidad de indicar al paciente que realice las contracciones necesarias para obtener el parámetro de la fatiga.
- Detener Prueba: Al presionar este botón se eliminan los datos del Vector “Valoración”, además se realiza una llama a la función “repaint ()” y así eliminar la gráfica dibujada y se envía un carácter 0 al módulo de comunicación para que detenga la comunicación y apague el led verde del mango instrumentado.
- Analizar Datos: Al presionar este botón se cerrará la pantalla “Prueba de Fuerza para Usuario” y se abrirá la Pantalla de “Analizar datos”, pantalla en la que se mostraran las gráficas y resultados de las pruebas hechas con anterioridad al paciente actual.
- Salir: Al presionar este botón se cerrará la pantalla “Prueba de Fuerza para Usuario” y se abrirá la Pantalla de “Menú”.

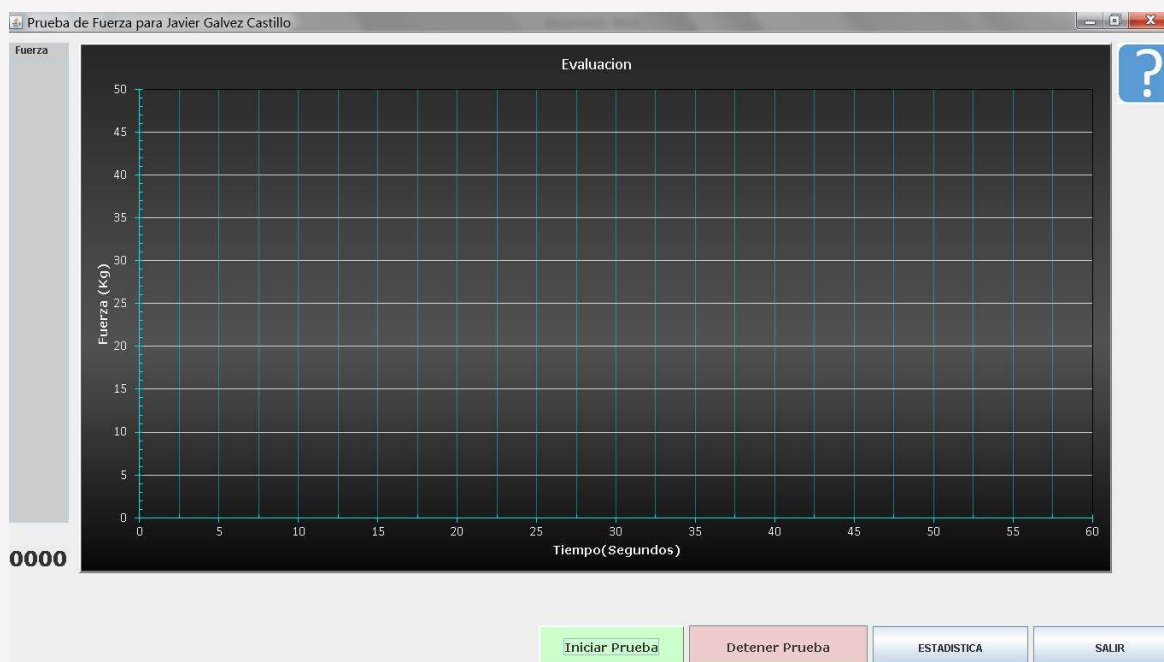


Figura 47. Pantalla Prueba de Fuerza.

De la pantalla “Menú” al presionar el boton “Analizar Datos”, el sistema abrira un cuadro de dialogo para pedir al evaluador la clave del paciente, para obtener toda la informacion de las pruebas echas con anterioridad al paciente.

En esta pantalla el usuario cuenta con tres opciones

- Valoracion: cierra la pantalla “Análisis de Datos ” y abre la pantalla “Evaluacion de Fuerza de paciente” .
- Exportar datos: genera un archivo de las pruebas en formato CSV (comma-separated values) el cual puede ser abierto desde diferentes programas como Excel, Matlab permitiendo un analisis más extenso en otras herramintas que sean conocidas por el evaluador.
- Salir: cierra la pantalla “Análisis de Datos ” y abre la pantalla “Menú”.

En esta pantalla se muestran los datos que se tiene del paciente, además se cuenta con una gráfica de fuerza en el tiempo y se cuenta con una tabla con los resultados obtenidos de cada una de las pruebas realizadas al paciente, entre estos datos se encuentra.

- Número de prueba
- Nombre del evaluador
- Fuerza Máxima
- Fuerza promedio
- Coeficiente de variación en porcentaje
- Índice de fatiga

Y se cuenta con un cuadro de selección cuya función al ser activado es graficar los datos obtenidos de la prueba, en la Figura 48 se muestra la pantalla de Análisis de datos.

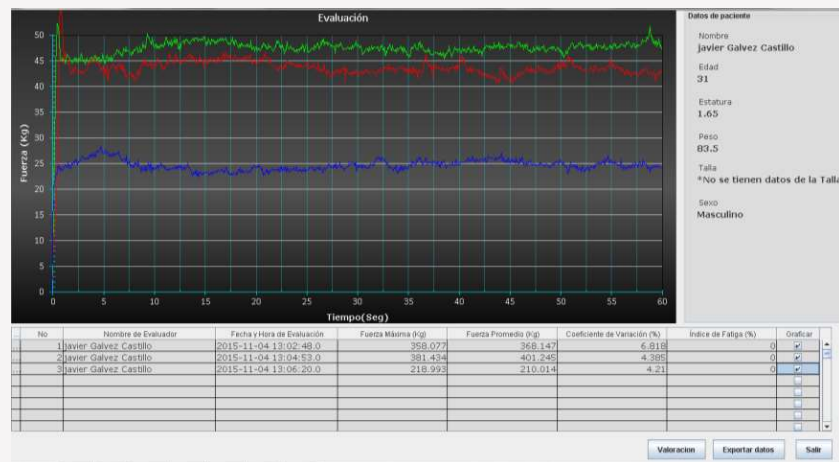


Figura 48. Pantalla Análisis de datos.

Los datos que se obtienen del dispositivo son almacenados en la base de datos para su análisis posterior. Sin embargo, debido a que la información mostrada presenta ruido, se diseñó un filtro paso bajas FIR (Finite Impulse Response, por sus siglas en inglés) con una frecuencia de corte de 5 Hz y una frecuencia de muestreo de 37 Hz (frecuencia de pintado de la gráfica), con lo que atenúamos las variaciones y mejora la calidad de las gráficas mostradas, cabe mencionar que el filtro es únicamente con el fin de suavizar las gráficas y no para modificar los datos almacenados, ya que los datos pueden ser exportados para luego ser analizados en herramientas más robustas como Matlab.

Para el diseño del filtro se usó la herramienta *Fdatool* de matlab, que permite obtener los coeficientes del filtro de manera rápida y sencilla. El filtro diseñado es un filtro paso bajas *Least-squares* con frecuencia de paro de 15 Hz y una frecuencia de corte de 8 Hz.

En la Figura 49, podemos observar la señal original (sin filtro) de la fuerza en color rojo y la señal filtrada en color verde.

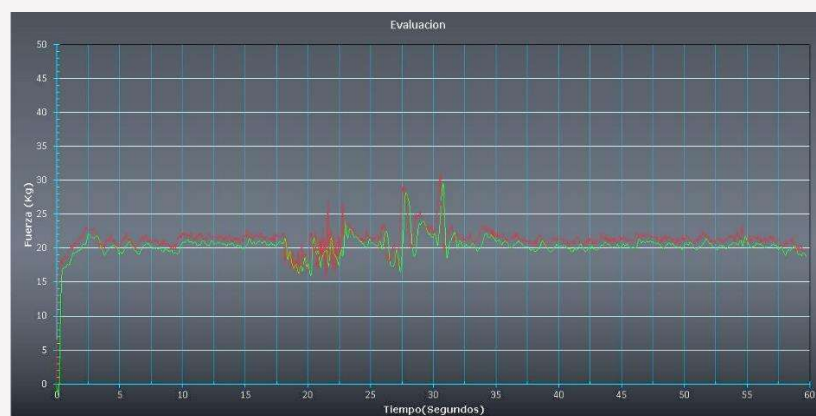


Figura 49. Señal con filtro (verde) y Señal sin Filtro (roja).

4.8.3 Pruebas

Para esta iteración no se llevaron evaluaciones rigurosas, ya que se detectó un error de diseño grave. En [46] se encontraron algunas recomendaciones sobre la forma que debe tener el mango: tamaño al menos la medida de la palma, anchura para la obtención de la fuerza máxima de 40 a 65 mm, un diámetro de 30 mm y una forma ovalada que está asociada a la pinza de agarre. La forma del mango en esta tercera iteración no cumplía

con dichos requerimientos y no se podían garantizar que la fuerza de pinza máxima que se podía medir correctamente. En [51] se usan cilindros de diferentes diámetros y mediante un guante instrumentado se obtienen las fuerzas que se ejerce en cada punto de los dedos y se demuestra que el diámetro influye en la fuerza que se puede ejercer.

A este punto de la metodología, se cuenta con un diseño ergonómico del mango con guías visuales, que ayudan al usuario a saber cuál es la forma correcta de sujetarlo. Además, el mango cuenta con un led que se ilumina una vez que el dispositivo comienza la lectura y se apaga cuando termina de adquirir todos los datos. De esta forma, el dispositivo comunica al paciente que presione o que deje de hacerlo, además de que cuenta con una flecha que permite saber cuál es la parte superior y la parte inferior del mango, lo que evita problemas en la lectura.

4.9 Cuarta Iteración

4.9.1 Diseño

Para la cuarta iteración, se partió de la premisa que la plataforma estará orientada a una población específica, en lugar de desarrollarlo utilizando estándares de una población caucásica. Para esta iteración, el diseño del mango fue basado en un estudio antropométrico realizado a 30 personas de un centro de rehabilitación en Orizaba Veracruz [52]. A partir de dicho estudio se obtuvieron las siguientes guías de diseño: 1) un diámetro de 30 mm, 2) una forma ovalada, 3) distancias entre los centros de cada parte del mango de $D_i=53$ mm, $D_m=65$ mm, $D_a=61$ mm, $D_e=40$ mm, para los dedos índice, medio anular y meñique respectivamente como se muestra en la Figura 50. Las distancias entre los centros se obtuvieron de las sumas de las medidas medias de las falanges, ponderando dichas medidas al valor recomendado para la obtención de la máxima fuerza de pinza de agarre. La separación entre los dedos obtenida a partir del estudio antropométrico fue de: 21 mm entre los dedos índice y medio, 20 mm entre los dedos medio y anular, 20 mm entre los dedos anular y meñique.

También se realizó una curva para aumentar la superficie de contacto de los músculos del dedo pulgar y permitir el flujo sanguíneo. Se realizaron pruebas de flexión con ayuda del software Solid Works utilizando el diseño propuesto y con el estándar usado para las pruebas de máxima fuerza [53]. En la Figura 51, se puede observar que con el diseño propuesto existe una mayor deformación de la celda de carga (entre más rojo se encuentra la imagen, el objeto tiene una mayor flexión) y en consecuencia es posible medir un voltaje proporcional a la fuerza de agarre de mayor magnitud.

Se construyeron ambos mangos utilizando un CNC de madera y fueron presentados a un experto en rehabilitación y él se inclinó por el diseño recto como se muestra en la Figura 51 a la izquierda, se le da la opción de elegir en busca de un nivel de aceptación más alto como se menciona en [30]. El argumento del especialista fue textualmente *“Está muy cómodo, sin embargo, necesito que no tenga curvas tan pronunciadas ya que los pacientes a quienes voy a evaluar no siempre tienen los rangos de movilidad completos”*.

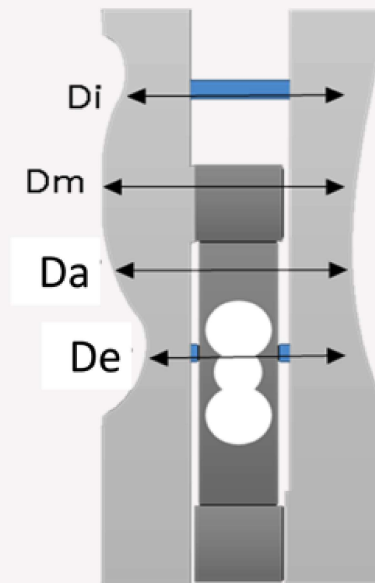


Figura 50. Diseño del Mango.

Por lo anterior decidimos rediseñar el mango propuesto, tomando un porcentaje del 10% de la diferencia más grande de medidas obtenidas y una medida máxima de 50 mm. Dando como resultado las siguientes medidas $D_i = 48.8$ mm, $D_m = 50$ mm, $D_a = 49$ mm, $D_e = 47.5$ mm. En la Figura 51 derecha, se puede observar el mango con las atenuaciones realizadas para las falanges de mano.

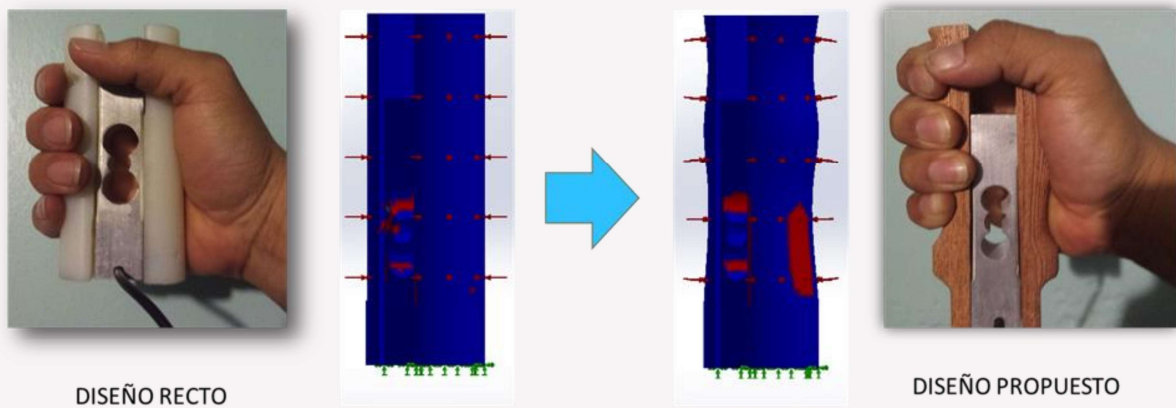


Figura 51. Comparación entre propuestas – Deformación Mecánica -



Figura 52. Comparación entre propuestas realizada por un usuario experto

4.9.2 Prototipado

Todos los componentes de la iteración anterior se mantuvieron. En esta iteración se mejoró en la caracterización de la fuerza medida ahora con el nuevo diseño del mango.

Para caracterizar el dispositivo, se diseñó un mecanismo basado en dos guías lineales y un tornillo que permite controlar el desplazamiento para generar diferentes estímulos de fuerza tanto incrementales como decreméntales y utilizando un dinamómetro de la marca IMADA (Imada Inc, Estados Unidos) modelo DS2-110 (resolución de $\pm 0.2\%$ en un rango de trabajo de 50 kg a escala completa) como dispositivo de referencia. Se realizaron pruebas para obtener la curva de calibración del dispositivo. En la Figura 53, se muestra el mecanismo usado para la caracterización del mango.

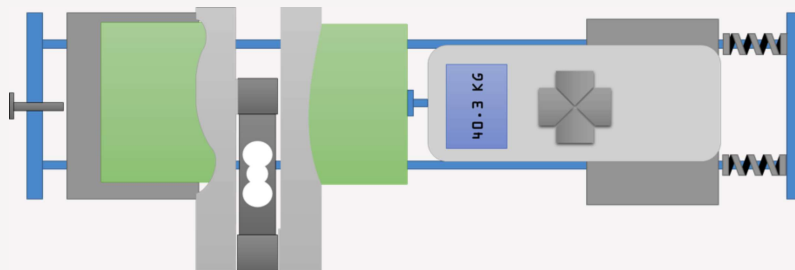


Figura 53. Mecanismo para la calibración del mango instrumentado.

Se realizaron 15 pruebas, en cada una de ellas el dispositivo fue sometido a estímulos incrementales y decreméntales, para cada de los estímulos se obtuvieron 77 mediciones en todo el rango de 0 a 38 kg en incrementos de 500 g. Dando como resultado un conjunto de 2310 mediciones, con ellas se obtuvo la curva de calibración del dispositivo, realizando una interpolación lineal de primer orden utilizando mínimos cuadrados. La curva obtenida tuvo un coeficiente de correlación lineal de $R^2=0.9993$ y está descrita por la Ecuación 7. En la Figura 54, se observa la curva obtenida en color magenta, donde los datos del eje horizontal corresponden a las mediciones obtenidas del voltaje obtenido de la celda de carga y el eje vertical corresponde al valor de fuerza de referencia, los puntos en azul corresponden a los puntos evaluados utilizando la curva de calibración y la ecuación (10) se representa con una línea de color rojo.

$$Fuerza = 9.9403 * VoltajeCelda - 4.6765 \quad (7)$$

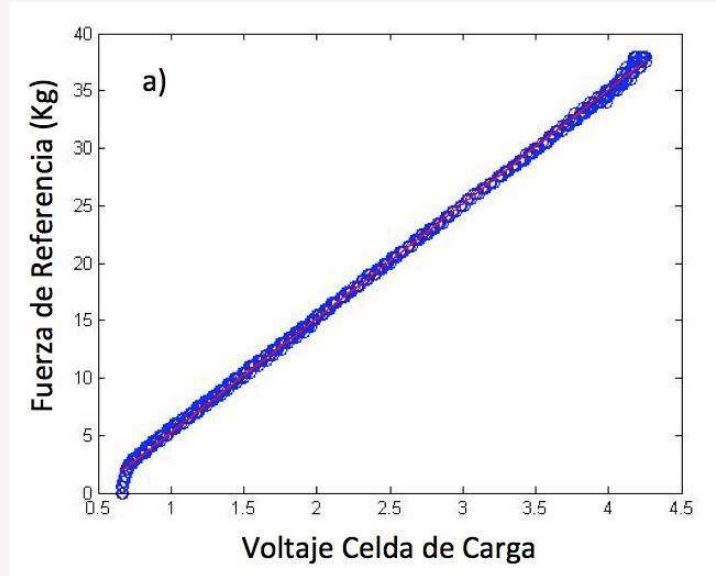


Figura 54. Respuesta del sensor y una linealización.

Para reducir el error en los extremos, se propuso utilizar otras dos curvas de calibración. Todas utilizando el criterio de los mínimos cuadrados. La primera es una curva de segundo orden y se utilizó para estimar el rango de 0 a 4 kg, la segunda es una curva de primer orden y se utilizó para estimar el rango entre 4 y 34 kg, la última es una curva de segundo orden y se utilizó para estimar el rango entre 32 y 38 kg. Las curvas de calibración resultantes son descritas por las ecuaciones (8) (9) y (10) con sus correspondientes rangos de aplicación al voltaje de la celda de carga:

$$Fuerza = -124.2692 * VoltajeCelda^2 + 206.2091 * VoltajeCelda - 81.6380 \quad (8) \\ \forall VoltajeCelda [0, 0.8770] Volts$$

$$Fuerza = 9.7467 * VoltajeCelda - 4.1481 \quad (9) \\ \forall VoltajeCelda (0.8770, 3.92) Volts$$

$$Fuerza = 5.9270 * VoltajeCelda^2 - 35.6652 * VoltajeCelda + 82.6885 \quad (10) \\ \forall VoltajeCelda [3.92, 5] Volts$$

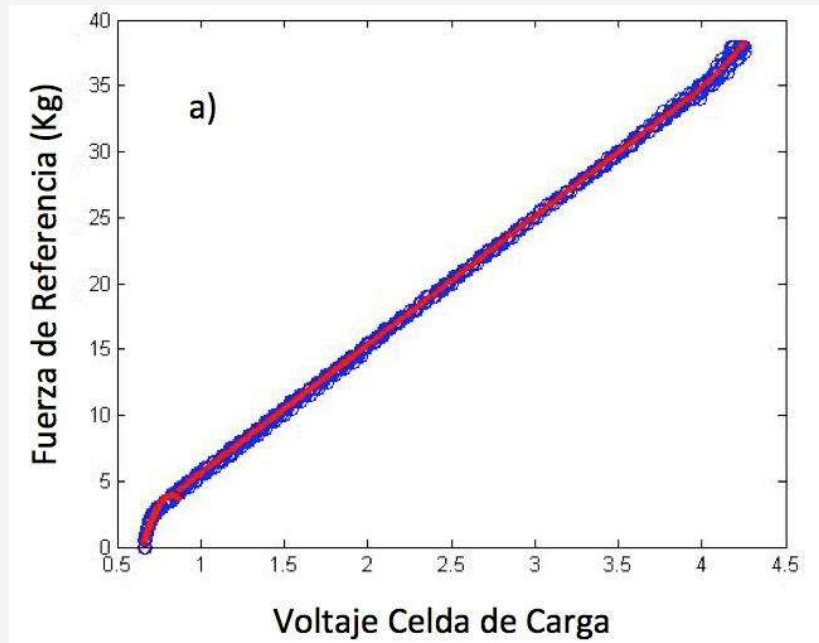


Figura 55. Respuesta del sensor y tres linealizaciones.

4.9.3 Pruebas

4.9.3.1 Evaluación heurística

Visibilidad del estado del sistema

Módulo de comunicación

- El módulo de comunicación cuenta con un led RGB que permite informar al usuario cual es el estado actual de la comunicación iluminando el módulo hasta en 6 colores diferentes, además cuenta con un byte de estado mediante el cual se envía la información sobre los siguientes datos: estado de la conexión, envío de *checksum* que asegura la fiabilidad de los datos enviados, y que permite enviar mensajes al usuario sobre el estado actual del sistema.

Mango Instrumentado

- El mango cuenta con un led de color verde que se ilumina cuando este se encuentra en modo de lectura lo cual permite al usuario saber el momento en el cual puede comenzar a ejercer fuerza sobre el dispositivo.

Software

- El software está programado para recibir datos que sean validados mediante el *checksum* y además decodifica la información del byte de estado lo cual permite informar al usuario mediante mensajes sobre las posibles fallas.

Utilizar el lenguaje de los usuarios

Módulo de comunicación

- No aplica

Mango Instrumentado

- No aplica

Software

- La información que se muestra en cada una de las pantallas del software, usa lenguaje que los usuarios dominan, evitando en medida de lo posible las palabras técnicas, para informar sobre las fallas o para las posibles soluciones, limitándose al lenguaje común.

Control y libertad para el usuario*Módulo de comunicación*

- No aplica.

Mango Instrumentado

- No aplica.

Software

- En las pantallas de valoración, informe, se cuenta con un botón que permite regresar al menú principal, en la pantalla de valoración se cuenta con un botón que permite cancelar la prueba, reiniciar la prueba y regresar al menú principal.

Consistencia y estándares*Módulo de comunicación*

- El módulo cuenta con conectores USB que siguen un estándar de comunicación USB 2.0, el conector para el mango instrumentado está diseñado para usarse únicamente en este dispositivo. Los colores usados para reportar fallas se eligieron en base a la norma mexicana NOM-003-segob/2002 en la cual se define el significado de los colores de seguridad de la siguiente manera.

COLOR DE SEGURIDAD	SIGNIFICADO
ROJO	PROHIBICION PELIGRO
AMARILLO	PRECAUCION RIESGO
VERDE	CONDICION SEGURA
AZUL	OBLIGACION INFORMACION

Tabla 7. Código de Colores*Mango Instrumentado*

- El diseño ensanchado, las curvas, así como la forma ovalada del mango debería de proveer información suficiente para saber cuál es la posición de la mano, el material (acetal blanco), es un material de grado farmacéutico.

Software

- El software cuenta con secciones en donde se piden los datos que los usuarios normalmente usan para el registro, las unidades que se usan en las gráficas (kilogramos) son unidades que los usuarios toman como referencia para realizar el análisis.

Prevención de errores

Módulo de comunicación

- El módulo de comunicación está programado para detectar cuando no se ha realizado bien la instalación del software y cuando el mango instrumentado no está conectado o los valores de lectura se encuentran fuera de los rangos esperados. Informando al usuario del problema mediante un código de colores, además, cuenta con un byte de estado que envía información sobre los posibles errores para enviarlos al software y que se reporten al usuario.

Mango Instrumentado

- El mango cuenta con un led de color verde que se ilumina cuando este se encuentra en modo de lectura lo cual permite al usuario saber el momento en el cual puede comenzar a ejercer fuerza sobre el dispositivo y guías visuales que ayudan a evitar que una prueba se realice mal.

Software

- El software está diseñado para que los campos de texto no acepten números, para recibir un byte de estado que permite identificar errores en el módulo e informar al usuario del posible error y brindar posible solución una solución.

Reconocimiento antes que recuerdo

Módulo de comunicación

- Se cuenta con una guía visual sobre el conector para el mango, el conector USB se deja ya que los usuarios cuentan con el conocimiento para reconocer un puerto USB.

Mango Instrumentado

- El mango cuenta con marcas que representan los dedos para ayudar al usuario a saber cuál es la forma correcta de tomar el mango.

Software

- Cada uno de los campos cuenta con título que ayuda al usuario a saber cuál es la información requerida en dicho cuadro de texto, además se cuenta con una línea de proceso que permite al usuario saber en qué paso se encuentra para realizar una prueba.

Visibilidad del estado del sistema

Módulo de comunicación

- No aplica.

Mango Instrumentado

- No aplica.

Software

- La información recopilada en las pruebas permite realizar diferentes análisis, además permite importar los datos en un texto plano CSV para realizar análisis estadísticos en Excel, Matlab, etc.

Estética y diseño minimalista

Módulo de comunicación

- El módulo de comunicación cuenta únicamente con dos conexiones, una USB y una conexión para el cable plano del mango instrumentado. Toda la electrónica se encuentra dentro de una caja cuadrada con las puntas redondeadas donde los leds proyectan su luz en su pared superior, evitando que se necesite una ventana o la salida del led. Únicamente cuenta con unas guías visuales en los conectores, evitando que el diseño se vea saturado de información innecesaria.

Mango Instrumentado

- El mango está formado únicamente por 7 piezas, necesarias para su funcionamiento y cuenta con guías visuales para los dedos evitando que se sature de información innecesaria que pudiera comprometer la sencillez del diseño.

Software

- Las pantallas del software muestran únicamente la información necesaria, y en caso de requerir más información se cuenta con un icono de ayuda que permite mostrar más información sobre las actividades que se deben realizar, las gráficas mostradas durante la evaluación están filtradas para evitar que se grafique ruido y que la gráfica se sature de información innecesaria.

Ayuda a los usuarios a reconocer y recuperarse de errores

Módulo de comunicación

- El módulo de comunicación se ilumina de color rojo cuando ocurre un error en la instalación, se ilumina de color amarillo cuando el mango no está conectado o el cable presenta algún desperfecto, en caso de no presentar ningún error el dispositivo se ilumina de color verde.

Mango Instrumentado

- Si el led se ilumina en color verde, entonces se puede iniciar la prueba. Si el led no prende entonces es signo de que el cable está dañado o que no se ha realizado una prueba.

Software

- Los problemas encontrados en la comunicación de los módulos se reciben en el byte de estado el cual es decodificado y se mandan mensajes que permiten al usuario estar informado del error y de cómo solucionar el error.

Los códigos de error en el byte de estado se muestran en la siguiente tabla:

Código	Causa	Solución
00	Ninguna falla	El sistema funciona correctamente
01	Fallo en el mango	Cambiar el cable
02	Fallo en los rangos	Desconectar y conectar el cable del mango instrumentado

Tabla 8. Byte de estatus y sus códigos.

Ayuda y documentación

Módulo de comunicación

- La información referente a las características, funcionamiento configuración se encuentra en la guía de uso rápido.

Mango Instrumentado

- La información referente a las características, funcionamiento configuración se encuentra en la guía de uso rápido.

Software

- La información referente a las características, funcionamiento y configuración se encuentra en la guía de uso rápido; además cada pantalla del software cuenta con un icono de ayuda Figura 47, el cual permite al usuario obtener más información sobre la pantalla actual, los botones y sus funciones, y que se supone que el usuario debería de realizar en esa pantalla. Para activarlo, es necesario que el usuario coloque el cursor del ratón sobre el cuadro icono.



Figura 56. Icono de ayuda

Todas las características sobre la evaluación heurística del sistema se pueden resumir en la Tabla 9.

Heurística a evaluar	Mango Instrumentado	Modulo de Comunicación	Software
Visibilidad del estado del sistema	Una luz verde indica cuando se realiza una evaluación	Cambia de color dependiendo del estado del sistema	Informa en todo momento el estado del sistema y de sus diferentes elementos
Relación entre el sistema y el mundo real	N/A	N/A	El lenguaje y las unidades usadas están orientadas al perfil del usuario
Control y libertad del usuario	El usuario puede terminar la prueba en cualquier momento	N/A	Se permite la cancelación de las pruebas y el desplazamiento en el proceso de lectura
Consistencia y estándares	El mango está diseñado ergonómicamente, el material es de grado farmacéutico	Los conectores son estándar o especializados, evitan errores en la conexión	Las gráficas permiten relacionar las acciones tomadas
Prevención de errores	Las conexiones cuentan con mecanismos para evitar errores en la conexión	Las conexiones cuentan con mecanismos para evitar errores en la conexión	Se chequea en todo momento la información y estado del sistema
Reconocimiento antes que recuerdo	Se colocaron guías visuales para saber cuál es la forma correcta de agarre	N/A	Cada opción cuenta con diálogos extendidos que explican el funcionamiento a profundidad
Flexibilidad y eficiencia de uso	N/A	N/A	Permite evaluar y obtener datos sobre la fuerza
Estética y diseño minimalista	Diseño con pocos elementos visibles	Diseño simple, solo dos conexiones, sensor y computador	La plataforma cuenta solo con la información necesaria para realizar las pruebas
Ayudar a los usuarios a reconocer	Led indicador de Funcionamiento	Leds que iluminan el módulo de diferentes colores según el estado del sistema	Los mensajes informan y ayudan al usuario a evitar errores
Ayuda y documentación	Guía de usuario y Manual	Guía de usuario y Manual	Guía de usuario y Manual

Tabla 9. Resumen de heurísticas.

4.9.3.2 Pruebas de Evaluación de la experiencia de usuario

Una prueba de experiencia de usuario es una prueba de usabilidad que involucra a los usuarios para determinar qué tan rápido y fácil pueden realizar su trabajo usando el nuevo diseño. Al involucrar a los usuarios es posible saber si el prototipo será aceptado o rechazado. Para el dispositivo se realizaron pruebas de usabilidad con usuarios las cuales se llevaron a cabo en la Facultad de Medicina de la UAEMex.

Se realizaron las pruebas con 5 usuarios ya que, según Nielsen, con cinco usuarios se puede encontrar casi tantos errores de usabilidad como cuando usas más [7], [20]. Todos los usuarios cumplen con las características del perfil, formación en Terapia Física.

Objetivo

Con esta prueba se pretende conocer la usabilidad general del sistema SUS (escala de usabilidad del sistema), obteniendo un valor SUS superior a 65%, nos aseguramos que los usuarios pueden: instalar exitosamente el dinamómetro a una computadora, usar el sistema para realizar una valoración, dar de alta un paciente, registrarse como evaluadores e informar al paciente sobre los resultados obtenidos durante la prueba (coeficiente de variación, índice de fatiga, fuerza máxima y fuerza promedio).

Lugar

La prueba se llevó a cabo en la Facultad de Medicina del Estado de México en la sala de juntas del área de rehabilitación. La distribución de la habitación y de los participantes en la prueba se muestra en la Figura 57.

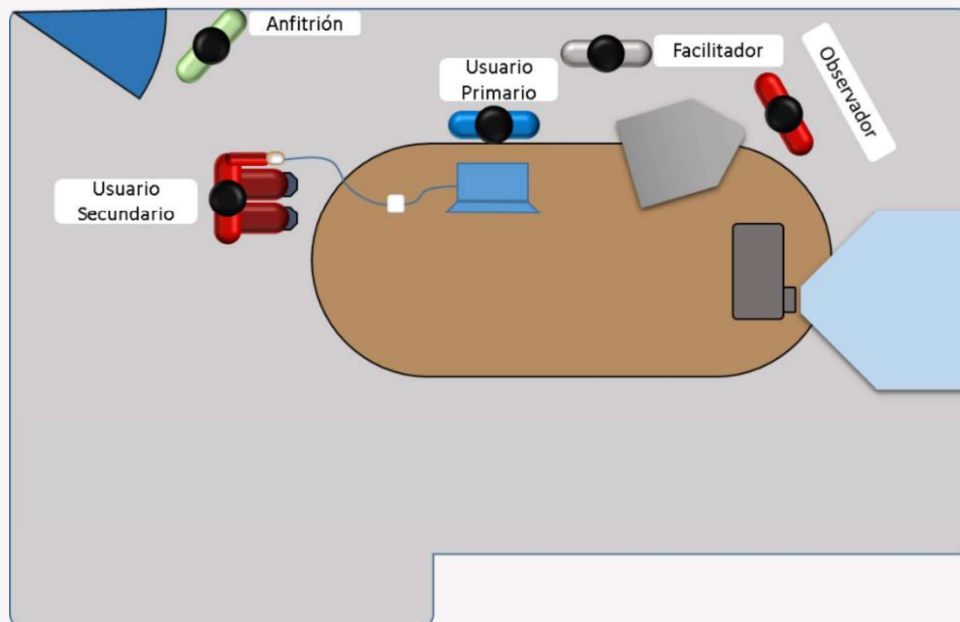


Figura 57. Layout para la prueba.

Sesiones

Se propusieron cinco sesiones de media hora, en las cual se tenían contemplados, 15 minutos por retardos y 15 minutos para preparar la nueva prueba y en caso de que la prueba se prolongara. El itinerario se muestra en la Tabla 10.

Hora		Actividad	Usuario
08:00 a. m.	08:15 a. m.	Tolerancia	Usuario 1
08:15 a. m.	08:30 a. m.	Prueba de usabilidad	
08:30 a. m.	08:45 a. m.		
08:45 a. m.	09:00 a. m.	Preparar Prueba	
09:00 a. m.	09:15 a. m.	Tolerancia	Usuario 2
09:15 a. m.	09:30 a. m.	Prueba de usabilidad	
09:30 a. m.	09:45 a. m.		
09:45 a. m.	10:00 a. m.	Preparar Prueba	
10:00 a. m.	10:15 a. m.	Tolerancia	Usuario 3
10:15 a. m.	10:30 a. m.	Prueba de usabilidad	
10:30 a. m.	10:45 a. m.		
10:45 a. m.	11:00 a. m.	Preparar Prueba	
11:00 a. m.	11:15 a. m.	Tolerancia	Usuario 4
11:15 a. m.	11:30 a. m.	Prueba de usabilidad	
11:30 a. m.	11:45 a. m.		
11:45 a. m.	12:00 p. m.	Preparar Prueba	
12:00 p. m.	12:15 p. m.	Tolerancia	Usuario 5
12:15 p. m.	12:30 p. m.	Prueba de usabilidad	
12:30 p. m.	12:45 p. m.		
12:45 p. m.	01:00 p. m.		

Tabla 10. Itinerario de pruebas de experiencia de usuario.

Equipo

Para la realización de la prueba fue necesario contar con:

- Plataforma de apoyo a la valoración de la capacidad muscular de la mano
- Computadora con sistema operativo Windows 7 a 64 bits
- Una cámara de video
- Habitación con mesa y sillas

Participantes

Se han considerado a cinco especialistas en rehabilitación o áreas a fin, los cuales fueron contactados por el Maestro Arturo Martínez Cosme, Coordinador del área de Terapia Física y Terapia Ocupacional de la Facultad de Medicina.

Nombre	Especialidad
██████████	Médico del deporte
████████████████████	Docente con Formación en Terapia Física
██████████████████	Terapia Ocupacional
██████████████	Terapia Ocupacional
██████████████	Terapia Ocupacional

Métricas

De las pruebas realizadas se pretende obtener:

- Numero de objetivos completados correctamente.
- Errores críticos (tareas no completadas o mal completadas).
- Errores no críticos (errores en la navegación, en los datos requeridos).
- Número de Participantes que completaron la tarea sin errores.
- Cuestionario que incluye Gustos, Disgustos, Recomendaciones y un cuestionario para obtener SUS.

Roles

La prueba de experiencia de usuario de la plataforma fue conducida por las siguientes personas:

Facilitador: [REDACTED]

Anfitrión: [REDACTED]

Observador: [REDACTED]

Anfitrión

El rol del anfitrión fue dar la bienvenida a los usuarios, ofrecer un refrigerio, presentar al equipo, informar al usuario de lo simple y rutinario de la prueba, así como de su objetivo, enfatizando que en ningún momento se evaluara la capacidad del usuario. Para lo cual se realizó el siguiente guion:

“Buenos días, de antemano agradecemos su apoyo para la realización de las pruebas, y quiero mencionarle que la prueba que se realizara es con el objetivo de evaluar la plataforma y no a usted, por lo que, cualquier problema que se presente será una oportunidad para mejorar el diseño, En esta prueba no existen respuestas correctas e incorrectas por lo que agradeceremos de sobremana su objetividad y honestidad para con la prueba, ya que esto nos dará un panorama más claro de las mejoras que se deben realizar a la plataforma.

La sesión consiste en lo siguiente:

Se le entregara una carta de consentimiento informado en donde queda estipulado que la prueba se realiza únicamente con fines de investigación y que usted es libre de continuar o dejar la prueba en cualquier momento incluso durante la misma, sin que esto repercuta de alguna manera.

Si así lo desea, se procederá a realizar la prueba, para tal efecto se le entregará una plataforma PVMCM, y usted deberá realizar una serie de tareas con ella para ponerla a prueba, dichas tareas se basarán en un escenario que mi compañero Javier le hará saber, la duración máxima es de 30 minutos.

Al término de la prueba se le entregara un cuestionario, con el cual concluiríamos la sesión.”

Facilitador

Entregar la plataforma, leer en voz alta al usuario el contexto de la prueba y dejarla al alcance del usuario. Dejar que el usuario se esfuerce a completar las tareas por sí mismo y ayudarlo como último recurso.

Observador

Tomar nota y grabar todos los escenarios de prueba.

La prueba comienza dando la bienvenida al participante en turno, explicando la dinámica de la prueba, así como los objetivos y se entrega la carta de consentimiento informado.



Figura 58. Anfitrión dando bienvenida a usuario.

Una vez firmada la carta de consentimiento y presentado el equipo se procede a entregar la plataforma (la cual consta de: un mango instrumentado, un módulo de comunicación, un cable plano un cable USB y una guía de uso rápido), además un guion con los escenarios de prueba, para consultas por parte del usuario. Además, se explica en que consiste la técnica *Think-aloud* y se sugiere su uso.



Figura 59. Facilitador y usuario en la prueba

El escenario que se plantea es del tipo detallado: Full Scale Scenario. En este tipo de escenario se indican detalladamente los pasos a seguir para completar cada uno de los objetivos del escenario de prueba. A continuación, se copia el texto de la descripción del escenario, que fue planteado a los usuarios que participaron en la prueba.

Como parte del equipamiento para los laboratorios de terapia física de la institución en la cual usted trabaja, se adquirieron plataformas para la valoración de la capacidad muscular de la mano PVCMM y es necesario probar que el sistema funciona correctamente, para lo cual usted debe realizar una prueba de funcionamiento, dicha prueba consiste en las siguientes tareas:

- a. *Conectar el dispositivo*
 - i. *Identificar cada uno de los elementos.*
 - ii. *Conectar el módulo de comunicación a la computadora.*
 - iii. *Conectar el dinamómetro a el módulo de comunicación.*
 - iv. *Esperar a que la computadora reconozca el dispositivo.*
- b. *Registrarse como evaluador*
 - i. *Abrir el programa dando doble clic en el icono PVCMM.*
 - ii. *Ingresar los datos para darse de alta.*
 - iii. *Presionar el Botón “**Registrar**”.*
- c. *Registrar a un paciente*
 - i. *Seleccionar la opción “**Registrar un paciente**”.*
 - ii. *Ingresar los datos del paciente.*
 - iii. *Presionar el botón “**Registrar**”.*
- d. *Realizar una valoración del paciente.*
 - i. *Presionar el botón “**Realizar una valoración**”.*
 - ii. *Entregar al paciente el dinamómetro y pedir que lo sujete de manera correcta.*
 - iii. *Indicar al paciente que únicamente cuando se ilumine en color verde ejerza su máxima fuerza posible.*
 - iv. *Presionar el botón “**Iniciar Prueba**”.*
 - v. *Esperar a que la Prueba concluya.*
 - vi. *Presione el botón “**Analizar**”.*
- e. *Consultar la información de una valoración*
 - i. *Identificar los datos necesarios para la valoración.*
 - ii. *Fuerza máxima.*
 - iii. *Fuerza Promedio.*
 - iv. *Coeficiente de Variación.*
 - v. *Índice de fatiga.*
 - vi. *Presionar el botón “**Salir**”.*

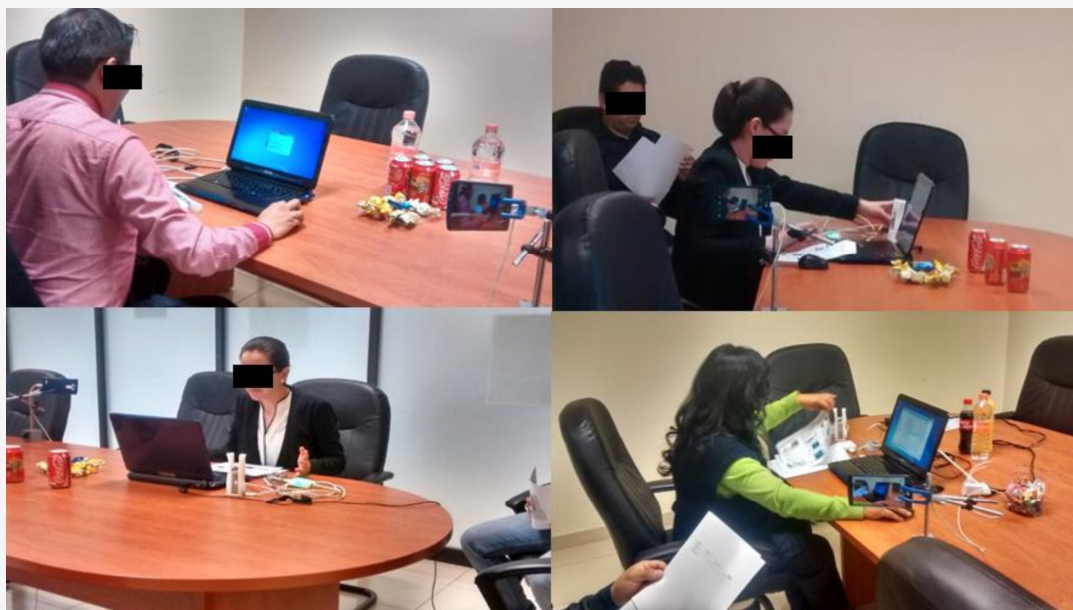


Figura 60. Pruebas de Usabilidad.

Cada prueba fue videograbada. Durante la prueba se aplicó la técnica *Single Ease Question* (SEQ), en la que, una vez alcanzado un objetivo se debe preguntar “En una escala del 1 al 7 donde 1 es extremadamente difícil y 7 es extremadamente fácil, ¿Qué tan fácil fue para ti alcanzar este objetivo?”. Los resultados del uso de esta técnica se muestran en la Tabla 11.

Single Ease Question							
Usuario	Objetivos					Promedio	Promedio General
Nombre	Conexión	Alta de Evaluador	Alta Paciente	Evaluación	Informar		
U1	1	3	6	4	2	3.2	3.8
U2	4	3	6	5	6	4.8	
U3	6	2	4	1	5	3.6	
U4	6	1	5	6	1	3.8	
U5	3	2	5	6	2	3.6	

Tabla 11. Resultado *Single Ease Question*.

De la tabla, las casillas en rojo representan los objetivos que no se lograron y se puede obtener el grado de efectividad del dispositivo usando la Ecuación 11, Con lo cual se obtiene un 84 % de efectividad.

$$Efectividad = \frac{\text{Numero de Objetivos logrados}}{\text{Numero total de objetivos}} \times 100 \% \quad (11)$$

Después de que la prueba fue completada, a cada usuario se le entregó un cuestionario para obtener el parámetro *System Usability Score* y sus recomendaciones para mejorar el sistema. En la Figura 61 se puede ver una muestra de dicho cuestionario.

Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
 Cuestionario de usabilidad y satisfacción de la plataforma FVCM

Fecha: _____

Nombre _____
 Especialidad _____
 Sexo _____ (M o F) Edad _____ (30)

¿Qué es lo que más le gusta de la plataforma?

¿Qué es lo peor de la plataforma?

¿Qué sugerencias tienes para mejorar la plataforma?

Marque con una "X" si usted está muy en desacuerdo (1) o muy de acuerdo (5)

	Muy en desacuerdo			Muy de acuerdo	
Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia	1	2	3	4	5
Encontré el sistema innecesariamente complejo	1	2	3	4	5
Pensé que el sistema era fácil de usar	1	2	3	4	5
Creo que yo necesito el apoyo de una persona técnica para poder utilizar este sistema	1	2	3	4	5
Me pareció que las diversas funciones en este sistema fueron bien integradas	1	2	3	4	5
Pensé que había demasiada inconsistencia en este sistema	1	2	3	4	5
Me imagino que la mayoría de la gente aprenderá a utilizar este sistema muy rápidamente	1	2	3	4	5
Me pareció que el sistema es muy complicado de usar	1	2	3	4	5
Me sentí muy seguro al utilizar el sistema	1	2	3	4	5
Tengo que aprender muchas cosas antes de poder usar este sistema	1	2	3	4	5

Figura 61. Formato de Cuestionario SUS

Para obtener el parámetro SUS [54] los datos obtenidos se deben someter a la ecuación 12.

$$SUS = ((P1 - 1) + (5 - P2) + (P3 - 1) + (5 - P4) + (P5 - 1) + (5 - P6) + (P7 - 1) + (5 - P8) + (P9 - 1) + (5 - P10)) * 2.5\% \quad (12)$$

Los resultados de la aplicación del cuestionario en esta prueba se muestran en la Tabla 12

USUARIO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	SUS Score
U1	5	1	2	1	4	4	5	1	3	1	77.5%
U2	4	3	5	5	1	5	4	5	5	5	40.0%
U3	4	3	4	2	3	2	4	2	3	2	67.5%
U4	3	3	5	5	2	2	3	4	4	5	45.0%
U5	2	3	3	4	3	3	4	3	2	4	42.5%

Tabla 12. Resultados cuestionario SUS

De la tabla anterior se obtiene un valor promedio de las pruebas de 54.5 %, el cual es un valor bajo, ya que éste debe ser mayor al 68 % para asegurar que el sistema no tiene problemas graves de usabilidad [54].

Debido a los resultados anteriormente obtenidos se decidió realizar una segunda prueba, corrigiendo los errores que se encontraron en esta primera prueba. Los cambios más importantes realizados al prototipo se enlistan a continuación:

- Se eliminó la necesidad de elegir el Puerto de Comunicación COMM; para ello se definió que el puerto a seleccionar de forma automática como configuración inicial debía ser el último puerto encontrado.
- Se cambió el color de iluminación del módulo de comunicación de verde a azul, ya que se generaba confusión al realizar una valoración, debido a que los colores del dinamómetro y del módulo de comunicación eran iguales. De esta forma se evita confundir el estado de comunicación del módulo con el de una prueba en curso.
- Se modificó el formato de las etiquetas del registro de evaluador y del registro de paciente, de esta forma se da mayor visibilidad a la información que es útil para el evaluador.
- Se cambió el color a rojo cuando los datos ingresados en las pantallas de registro de pacientes y de evaluadores no cumplían con el formato o no se incluían. De esta forma el usuario sabe cuáles son los datos que no corresponden y puede modificarlos.
- En la guía de uso rápido también se toman medidas para ayudar a lograr los objetivos.

Para la segunda prueba se replicó el mismo protocolo, también fue realizada en la Facultad de Medicina, con una misma duración de 30 minutos por prueba y 10 minutos entre pruebas para realizar la preparación de la siguiente prueba, Sin embargo; en esta ocasión las pruebas fueron realizadas con 5 alumnos del octavo semestre de la licenciatura de Terapia Ocupacional.

Nombre	Especialidad
[REDACTED]	Terapia Ocupacional
[REDACTED]	Terapia Ocupacional
[REDACTED]	Terapia Ocupacional
[REDACTED]a	Terapia Ocupacional
[REDACTED]	Terapia Ocupacional

Los resultados de la aplicación de la técnica SEQ para esta prueba se muestran en la Tabla 13.

Single Ease Question prueba final							
Usuario	Objetivos					Promedio	Promedio General
Nombre	Conexión	Alta de Evaluador	Alta Paciente	Evaluación	Informar		
U1	5	4	5	6	5	5	5.16
U2	4	4	6	6	6	5.2	
U3	4	5	6	5	4	4.8	
U4	6	4	5	7	6	5.6	
U5	4	5	6	6	5	5.2	

Tabla 13. Resultados Single Easy Question pruebas finales

Durante esta prueba todas y cada una de las actividades se lograron realizar, mientras que los resultados del Cuestionario SUS se muestra en la Tabla 14.

USUARIO	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	SUS Score
U1	5	1	5	1	5	1	5	1	4	1	97.5%
U2	4	3	4	3	4	3	4	2	4	3	65.0%
U3	4	1	4	1	5	1	4	1	3	1	87.5%
U4	5	2	4	2	4	2	5	2	4	1	82.5%
U5	5	1	5	1	5	1	5	1	3	1	95.0%

Tabla 14. Resultados cuestionario SUS pruebas finales.

De la tabla anterior, se obtiene un promedio general de 85.5% con lo cual podemos concluir según [54], que el dispositivo es usable y que hasta este momento la plataforma permite alcanzar los objetivos propuestos como son:

- Resolución de 9.8 gf.
- Frecuencia de muestreo de 100 Hz.
- Permite obtener parámetros como la fuerza máxima, fuerza promedio, coeficiente de variación e índice de fatiga.
- La plataforma permite almacenar en una base de datos cada una de las pruebas realizadas con la capacidad de mostrarlas en una gráfica.
- Permite comparar el comportamiento durante las pruebas y ayudar a determinar si se alcanzan valores de fuerza mayores.

Con las pruebas realizadas hasta el momento y por cuestiones de tiempo para la conclusión del trabajo de tesis, se ha determinado que la plataforma esta lista para su uso clínico e implementación ya que ha cumplido con requerimientos técnicos solicitados y los criterios de usabilidad.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este trabajo se ha presentado el proceso de diseño de una plataforma basado en la metodología UCD, donde a partir de las necesidades de los usuarios, se llegó a una plataforma compuesta por un mango instrumentado, un módulo de comunicación, y una aplicación para PC programada en Java, que en su conjunto permite obtener datos útiles para la valoración de la capacidad muscular de la mano como son: fuerza máxima, fuerza promedio, coeficiente de variación, índice de fatiga [2] [3]. Aunado a lo anterior la aplicación para PC permite almacenar información personal del paciente como lo son: Nombre, edad, estatura, peso y clave de registro para la gestión de la información de cada una de las pruebas realizadas. La aplicación cuenta con una sección que permite mostrar el histórico de cada una de las pruebas por separado o en conjunto para comparar el comportamiento de las pruebas realizadas a un mismo paciente.

El módulo de comunicación que se encarga de obtener la información de la fuerza de agarre de la mano tiene las siguientes características; una frecuencia de muestreo: 100 Hz suficiente para leer las señales generadas por las variaciones de la fuerza de la mano [15], captadas por el mango instrumentado ya que con dicha frecuencia de muestreo se cumple con la práctica común de muestrear hasta 10 veces más rápido que el componente frecuencial más rápido del fenómeno estudiado, resolución: 9.8 gf, menor al valor mínimo de fuerza controlable que una persona puede aplicar voluntariamente [7], Rango de medición de 38 kgf que es superior a los 9.07 kgf necesarios para determinar la funcionalidad de la mano según [11]. Por su parte la aplicación de PC tiene una frecuencia de refresco de la pantalla del sistema de 37 Hz con lo cual se puede percibir una gráfica fluida [7].

El mango instrumentado ha sido diseñado basado en el estudio ergonómico realizado por [46] y con ayuda de especialistas de la salud, para obtener la fuerza máxima de la mano, teniendo como resultado las siguientes medidas $D_i=48.8$ mm, $D_m=50$ mm, $D_a=49$ mm, $D_e=47.5$ mm lo que permite tener un diseño ergonómico con un área de contacto mayor a un diseño recto. El mango esta hecho en acetal, un material blanco de grado farmacéutico y al usar una celda de carga que no necesita de partes móviles, el diseño cumple con la heurística de ser minimalista y se minimiza la necesidad de mantenimiento.

En la tabla 15 se resumen las Características de la plataforma.

Característica	Esperado	Alcanzado
Resolución	>36.7 gf	9.8 gf
Rango de Medición	40 kgf	38 kgf
Frecuencia de Muestreo	100 Hz	100 Hz
Resistencia de fuerza máxima	>50 kgf	>50 kgf
Medición de fuerza máxima	Medir fuerza Máxima de la mano	Mide fuerza máxima de la mano
Medición del índice de fatiga	Medir índice de fatiga de la mano	Mide índice de fatiga de la mano
Medición de coeficiente de variación	Medir coeficiente de variación	Mide coeficiente de variación

Gestión de Información	Almacenar información de cada Paciente	Almacena información de cada paciente y prueba
Generación de reportes	Generar reportes sobre las pruebas	Cuenta con una función que exporta los datos de las pruebas realizadas a un archivo en formato cvs.

Tabla 15. Características de la plataforma

Este trabajo fue documentado y aceptado para ser presentado en la modalidad de poster en el Congreso Nacional de Instrumentación SOMI XXX, bajo el título “Mango instrumentado para la medición fuerza máxima sostenida de la mano”, con clave de registro OP_SOMI30_173 que se fue llevado a cabo en Durango, del 28 al 30 de octubre de 2015.

La plataforma ha sido calibrada para la correcta medición de la fuerza. Se han hecho pruebas sobre la fiabilidad de la comunicación asegurando que el tiempo de muestreo se mantiene constante, así como pruebas de usabilidad con usuarios especialistas en el área de terapia ocupacional donde se obtuvo un resultado SUS favorable del 85.5 % que asegura que la usabilidad es excelente según [54]. Por lo anterior, podemos determinar que esta lista para su implementación pues cumple con los objetivos planteados en las etapas del análisis funcional y de requerimientos.

Cabe destacar que la complejidad de cumplir con las expectativas de los usuarios es bastante grande, a tal grado que existen autores que mencionan que un diseño nunca está terminado, sino únicamente cumple con los requerimientos mínimos necesarios para ser implementado [20] [29] y en un futuro realizar mejoras para perfeccionar el diseño. Para alcanzar más objetivos en menos tiempo es recomendable usar la técnica del Mago de Oz [12], técnica habría reducido el tiempo para perfeccionar la interacción de la plataforma.

Esta investigación ha mostrado tener un buen desempeño en usuarios con conocimientos en rehabilitación física y ocupacional, sin embargo resulta de especial interés poner a prueba la plataforma en campo, aplicando pruebas clínicas en donde se tengan especialistas en rehabilitación física y ocupacional que ocupen la plataforma de forma cotidiana y contrastar los resultados obtenidos durante la investigación y verificar que la plataforma se pueda usar de forma efectiva en situaciones de uso clínico.

Aun cuando el mango instrumentado ha sido calibrado es recomendable, como trabajo a futuro y en pro de lograr una plataforma fiable a lo largo del tiempo, diseñar un mecanismo de auto calibración para la celda de carga, lo que permitiría a los usuarios mantener el mango instrumentado calibrado, logrando con esto prolongar la vida útil de la plataforma permitiendo realizar valoraciones de la capacidad muscular de la mano a más pacientes teniendo la seguridad de que las lecturas realizadas sean tan precisas como en un inicio.

Por otro lado, esta investigación puede tener un mayor alcance si el estudio realizado se extiende para el uso lúdico, pues ya se cuenta con una métrica formal y bien definida. Por lo que, a partir de este punto, se puede proyectar su aplicación a una serie de juegos o actividades que ayuden a mantener el interés de los pacientes en un proceso de rehabilitación, sin perder la rigurosidad de una medición de fuerza de agarre. Para permitir a los evaluadores mantener la formalidad para realizar pruebas de valoración de la capacidad muscular de la mano y aplicar su uso no solo para la medición de fuerza,

sino para la rehabilitación de miembros superiores [41] [16]. Sin embargo, esta actividad, así como la evaluación de esta se deja como trabajo a futuro ya que, por cuestiones de tiempo y alcances de esta investigación, dichas pruebas no fueron consideradas desde un inicio.

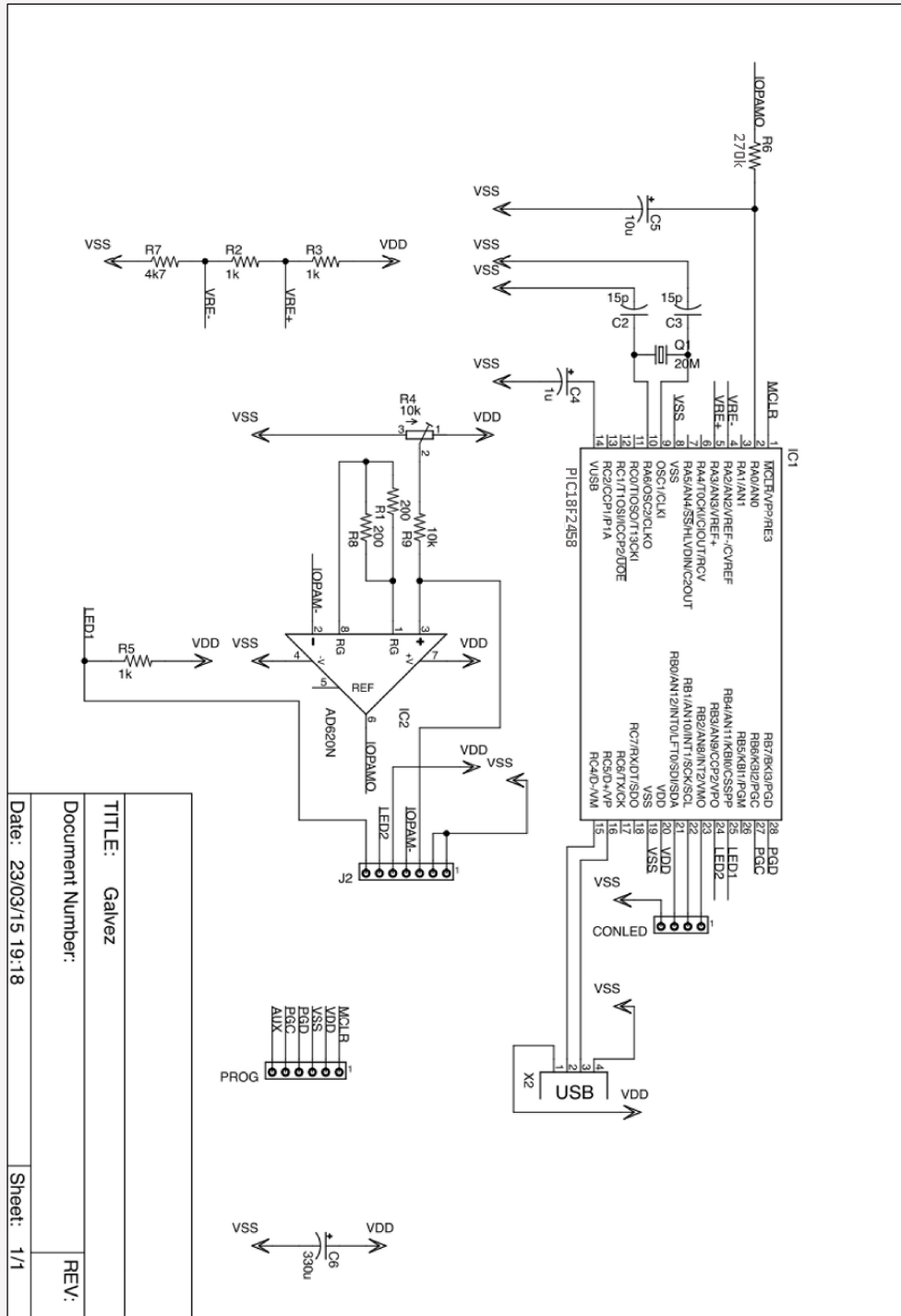
El trabajo presentado sirve como precedente para enfatizar la importancia de tomar en cuenta la metodología UCD, ya que para el diseño de este trabajo ha sido de gran ayuda, y se puede ver la evolución que ha tenido el proyecto desde sus primeras etapas, hasta lograr tener una plataforma usable y lista para, en un futuro, ser implementada en diferentes centros de rehabilitación física y ocupacional. La experiencia y conocimiento obtenidas a lo largo del desarrollo de esta tesis se puede aprovechar en otros proyectos o necesidades y así impactar positivamente en la población.

ANEXOS

Apéndice A

Diagrama eléctrico

El diagrama eléctrico que muestra la configuración electrónica del microcontrolador y del amplificador operacional para el funcionamiento del módulo de comunicación.



Apéndice C

Ejemplo cuestionario SUS

Ejemplo de un cuestionario aplicado durante las pruebas de usabilidad realizadas para evaluar la plataforma de apoyo a la valoración de la capacidad muscular de la mano

Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
 Cuestionario de usabilidad y satisfacción de la plataforma PVCM

Fecha: 11-Sep-2016

Nombre [REDACTED]
 Especialidad Terapia Ocupacional
 Sexo F (M o F) Edad 23 (30)

¿Qué es lo que más le gusta de la plataforma?
- No es necesario la ayuda de una persona con conocimientos técnicos
 ¿Qué es lo peor de la plataforma?
- No encontré algo negativo
 ¿Qué sugerencias tienes para mejorar la plataforma?
-

Marque con una "X" si usted está muy en desacuerdo (1) o muy de acuerdo (5)

	Muy en desacuerdo			Muy de acuerdo		
	1	2	3	4	5	
Creo que me gustaría utilizar este sistema con frecuencia						X
Encontré el sistema innecesariamente complejo	X					
Pensé que el sistema era fácil de usar						X
Creo que yo necesito el apoyo de una persona técnica para poder utilizar este sistema	X					
Me pareció que las diversas funciones en este sistema fueron bien integradas						X
Pensé que había demasiada inconsistencia en este sistema	X					
Me imagino que la mayoría de la gente aprender a utilizar este sistema muy rápidamente						X
Me pareció que el sistema muy complicado de usar	X					
Me sentí muy seguro utilizar el sistema				X		
Tengo que aprender muchas cosas antes de poder usar este sistema	X					

Apéndice D

Guía de uso rápido

En la guía se indican los elementos que componen la plataforma y sirve como una referencia rápida paso a paso de la secuencia para poner en funcionamiento la plataforma desde que se instala el software hasta la realización de una valoración de la capacidad muscular de la mano.



UJAEM
PVCMM



Plataforma de Apoyo para la Valoración de la Capacidad Muscular de la Mano

Guía de uso rápido

1. Requerimientos

Computadora con Sistema operativo Windows Xp/Vista/7, Puerto USB 1.0 o superior, 500Mb de Memoria

2. Contenido

- A. Dinamómetro
- B. Módulo de Comunicación
- C. Memoria Flash con software
- D. Cable USB tipo A-B (1.5mts)
- E. Cable plano (2.0mts)

3. Instalación del dispositivo

- Conectar el extremo tipo B del cable USB (D) al módulo de comunicación (B).



- Conectar el extremo tipo A del cable USB (D) a un puerto de la computadora, el módulo de comunicación debería brillar en color rojo momentáneamente.



extremo al Dinamómetro (A). ¡Asegúrese de insertar el cable según la siguiente figura!



- si se realizó de manera correcta el dispositivo debería brillar en color azul.



4. Software

- Insertar la memoria USB(C) en la computadora
- Ir a la ubicación de la memoria y copiar el archivo con el nombre PVCMM.exe
- Pegar el archivo PVCMM en el escritorio.

5. Valoración

- Ir al escritorio y dar doble clic en la aplicación PVCMM.exe con lo que se abrirá el sistema. En la esquina superior derecha de cada pantalla se cuenta con un icono de ayuda arrastre el mouse sobre el icono para obtener más información sobre la pantalla actual.
- Al ser la primera vez que se usa la plataforma se abrirá la pantalla de registro de evaluador en donde deberá darse de alta como evaluador introduciendo la información que

3. Instalación del dispositivo

- Conectar un extremo del cable plano (E) al Módulo de comunicación (B) y el otro



se requiere y presionando el botón registrar, el código de seguridad es "1XPVCM".

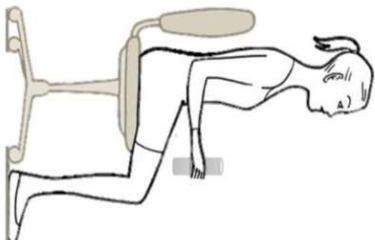
Introducir la clave de acceso que registró en el paso anterior y presionar la tecla Enter o el botón Entrar. Es importante que en este paso ya esté **conectado correctamente el dinamómetro**, de no ser así ir al paso 3.

Al ser la primera vez que se usa la plataforma deberá registrar a un paciente presionando el botón "Registrar a un paciente".

Introduzca los datos del paciente y presione el botón "Registrar".

Presionar el botón "Realizar una valoración".

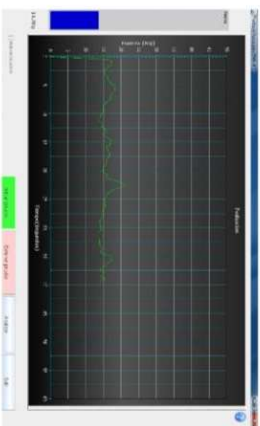
Introducir el número de expediente del paciente que desea valorar.
Colocar al paciente en posición de evaluación, como se muestra en la siguiente figura.



Dar al paciente el dinamómetro y pedirle que lo sujete con la mano que se va a evaluar, tal como se muestra en la siguiente figura. Indicar al paciente que mientras el dinamómetro este brillando en color verde debe presionarlo con todas sus todas sus fuerzas.



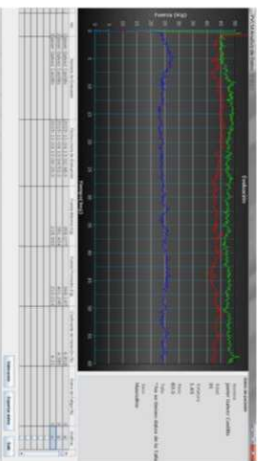
Presionar el botón "Iniciar Prueba", esperar 60 segundos a que la prueba concluya, en esta pantalla se podrá observar el comportamiento de la fuerza.



Transcurridos los 60 segundos el sistema le mostrará tres opciones
Cancelar: Elimina los datos y permite realizar una nueva prueba
Analizar: guarda la información y muestra los resultados

Guardar: almacena la información y permite realizar una nueva prueba.

- Presionar el botón "Analizar", con lo cual se abrirá una nueva pantalla que le permitirá conocer los resultados de la prueba realizada



6. Análisis de resultados

- En esta pantalla, usted podrá graficar todas las pruebas realizadas a este paciente únicamente marcando con un clic la casilla correspondiente.

- En esta pantalla encontrará los parámetros:

Fuerza Máxima: es el valor de la fuerza máxima ejercida dentro de los primeros cinco segundos

Fuerza promedio: es el promedio del valor de la fuerza que se obtuvo durante los 60 segundos.

Coefficiente de Variación: Es la relación entre el valor de la fuerza promedio y la variabilidad de la fuerza

Índice de fatiga: es la tasa de disminución de la fuerza en un periodo de 60 segundos

- Además, el sistema permite exportar los datos de las valoraciones en un formato separado por comas que permite el uso de herramientas de software como Excel, Matlab únicamente presionando el botón "Exportar datos".

7. Especificaciones Técnicas

Resolución : 200kgf
 Tiempo de muestreo: 10ms
 Rango de fuerza : 0-50Kgf



UAE

¿Necesitas más información?

Para atender tus dudas envía un correo a [redacted] o comunícate al [redacted]

Apéndice E

Consentimiento Informado

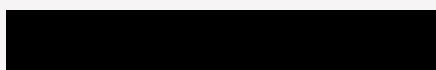


Consentimiento informado para participar en un estudio de investigación

Título del protocolo:

UCD: Plataforma de apoyo para la valoración de la capacidad muscular de la mano

Investigador principal:



Sede donde se realizará el estudio:

Facultad de Medicina UAEM

Antes de decidir si participa o no, debe conocer y comprender cada uno de los siguientes apartados. Este proceso se conoce como consentimiento informado. Siéntase con absoluta libertad para preguntar sobre cualquier aspecto que le ayude a aclarar sus dudas al respecto. Una vez que haya comprendido el estudio y si usted desea participar, entonces se le pedirá que firme esta forma de consentimiento, de la cual se le entregará una copia firmada y fechada.

1. Justificación del estudio.

Los dispositivos que se diseñan sin tomar en cuenta al usuario no se pueden implementar o presentan problemas de usabilidad.

2. Objetivo de estudio

Encontrar todos los posibles errores de interacción en la plataforma.

3. Beneficios del estudio

En otros estudios se ha comprobado que los dispositivos que se diseñan bajo metodologías que incluyan al paciente obtienen un mayor grado de usabilidad.

Con este estudio usted ayudará a encontrar los posibles errores a la plataforma que le permitirá obtener valores sobre la fuerza de la mano.

Este estudio permitirá que en un futuro los pacientes y evaluadores puedan beneficiarse con el dispositivo diseñando.

4. Procedimientos del estudio

En caso de aceptar participar, el estudio consiste en lo siguiente:

Se le entregara la plataforma y un manual

Se colocarán dos cámaras una para tomar video de usted y de la pantalla de la computadora

5. Aclaraciones

- Su decisión de participar en el estudio es completamente voluntaria.
- No habrá ninguna consecuencia desfavorable para usted, en caso de no aceptar la invitación.
- Si decide participar en el estudio puede retirarse en el momento que lo desee, aun cuando el investigador responsable no se lo solicite, pudiendo informar o no, las razones de su decisión, la cual será respetada en su integridad.
- No tendrá que hacer gasto alguno durante el estudio.
- No recibirá pago por su participación.
- Es de suma importancia que sepa que se evalúa el sistema y no al usuario.
- La información obtenida en este estudio, utilizada para la identificación de cada paciente, se mantendrá con estricta confidencialidad por el grupo de investigadores.
- Si considera que no hay dudas ni preguntas acerca de su participación, puede, si así lo desea, firmar la carta de consentimiento informado

7. Carta de consentimiento informado

Yo, _____ he leído y comprendido la información anterior y mis preguntas han sido respondidas de manera satisfactoria. He sido informado y entiendo que los datos obtenidos en el estudio pueden ser publicados o difundidos con fines científicos. Convengo en participar en este estudio de investigación.

Firma del participante

Esta parte debe ser completada por el Investigador

He explicado al Sr(a). _____ la naturaleza y los propósitos de la investigación; le he explicado acerca de los riesgos y beneficios que implica su participación. He contestado a las preguntas en la medida de lo posible y he preguntado si tiene alguna duda. Acepto que he leído y conozco la normatividad correspondiente para realizar investigación con seres humanos y me apegó a ella.

Una vez concluida la sesión de preguntas y respuestas, se procedió a firmar el presente documento.

Firma del Investigador

Fecha

REFERENCIAS

- [1] J. V. Montoya y V. Z. Pérez, "Valoración cuantitativa para la reincorporación ocupacional", *Revista Científica Salud Uninorte*, vol. 32, nº 2, pp. 319-336, 2016 Mayo.
- [2] M. D. Moya, M. R. Hervás, I. Bosch, J. D. G. Jaén, J. Bertomeu, F. M. González y A. C. F. a. A. B. Fernández, "¿Cómo se miden la fuerza y la fatiga de la mano?", *Revista de Biomecánica*, vol. I, nº 56, p. 48, 2011, Junio.
- [3] Amaral Josária F, M. Marcelly y Novo Júnior José M., "Comparison of three hand dynamometers in relation to the accuracy and precision of the measurements", *Revista Brasileira de Fisioterapia*, vol. 16, nº 3, pp. 216-224, 2012, Mayo.
- [4] D. Sawyer, "Do it by design: An Introduction of human factors in medical devices.", Diciembre 1996.
- [5] Alan Dix and Janet Finaly, "Chapter 5 Interaction design basics", de *Human-Computer Interaction*, Edinburgh, PEARSON Prentice Hall, 2004, pp. 191-224.
- [6] Food and Drug Administration, "Applying Human Factors and Usability Engineering to Medical Devices", *Center for Devices and Radiological Health*, p. 45, 2016 February 3.
- [7] Alan Dix and Janet Finaly, "Chapter 1 The human", de *Human-Computer Interaction*, Edinburgh, PEARSON Prentice Hall, 2004, pp. 12-58.
- [8] R. M. Wibowo, E. P. A y H. I., "Heuristic evaluation and user testing with ISO 9126 in evaluating of decision support system for recommendation of outstanding marketing officer", *International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET)*, , pp. 454-458, 2017.
- [9] INEGI, "ESTADÍSTICAS A PROPÓSITO DEL DÍA INTERNACIONAL DE LAS PERSONAS CON DISCAPACIDAD", INEGLinforma, Mexico, 2019 diciembre 2.
- [10] R. W. Bohannon, "Minimal clinically important difference for grip strength: a systematic review", *Journal of Physical Therapy Science*, vol. 31, nº 1, pp. 75-78, 2019.
- [11] H. Tyler, J. Adams y B. Ellis, "What can Handgrip Strength tell the Therapist about Hand Function?", *The British Journal of Hand Therapy*, vol. 10, nº 1, pp. 4-9, 2005.
- [12] A. Nosseir, D. Flood, R. Harrison y O. Ibrahim, "Mobile Development Process Spiral", *Proceedings - ICCES International Conference on Computer Engineering and Systems*, vol. 10, nº 1109, pp. 281-286, 2012.
- [13] U. S. Food and Drug Administration, "Applying Human Factors and Usability Engineering to Medical Devices. Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff", from <http://www.fda.gov/ucm/groups/fdagov-public/@fdagov-meddev-gen/documents/document/ucm259760.pdf>, February 3, 2016.

- [14] Elizabeth B. Brokaw, "Hand Spring Operated Movement Enhancer (HandSOME) Device for Hand Rehabilitation after Stroke", *IEEE*, nº 32, p. 6, 2010.
- [15] S. Gaurav, B. Sravya, I. Chakravorty, B. Muralidhar y M. Ganesh, "An Instrumented Glove for Monitoring Forces During Object Manipulation", *Point-of-Care Healthc Technol (PHT) IEEE*, pp. 212-215, 2013.
- [16] M. S. Cameirao, S. B. i. Badia, L. Zimmerli y E. D. Oller, "The Rehabilitation Gaming System: a Virtual Reality Based System for the Evaluation and Rehabilitation of Motor Deficits", *2007 Virtual Rehabilitation, Venice, Italy*, pp. 29-33, 2007.
- [17] W. Rogers and Amy L. Mykityshyn and R. Campbell and A. Fisk, "Analysis of a "Simple" Medical Device", *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications*, vol. 9, nº 1, pp. 6-14, 2001.
- [18] Y. Y. Huang and K. H. Low, "Initial analysis and design of an assistive rehabilitation hand device with free loading and fingers motion visible to subjects", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Singapore*, pp. 2584-2590, 2008.
- [19] D. W. a. S. Scholz, "User-Centered Design: Why and How to Put Users First in Software Development", de *Software for People: Fundamentals, Trends and Best Practices*, Berlin, Alemania, Springer, 2012, pp. 11-38.
- [20] D. D. McCracken, "Chapter 1 Human-Computer Interaction: an Overview", de *User-Centered Website Development :A Human-Computer Interaction Approach*, New Jersey, Prentice Hall, 2004, pp. 1-16.
- [21] E. G. Maida y J. Pacienza, "Metodologías de desarrollo de software [en línea]", . *Tesis de Licenciatura en Sistemas y Computación. Facultad de Química e Ingeniería "Fray Rogelio Bacon". Universidad Católica Argentina*, pp. Disponible en: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/metodologias-desarrollo-software.pdf>, 2015..
- [22] P. Kortum, "Chapter 1 - Introduction to the Human Factors of Nontraditional Interfaces,", de *HCI Beyond the GUI*, MORGAN KAUFMAN, 2008, pp. 1-24,.
- [23] L. R. Vijayasarathy y C. W. Butler, "Choice of Software Development Methodologies – Do Project, Team and Organizational Characteristics Matter?", *IEEE Software*, vol. 33, nº 5, pp. 86-94, Sept.-Oct. 2016.
- [24] S. Wantana y P. Nuttaporn, "Adopting a combination of Scrum and Waterfall methodologies in developing Tailor-made SaaS products for Thai Service and manufacturing SMEs", *10.1109/ICSEC.2016.7859882.*, pp. 1-6, 2016.
- [25] P. Letelier, "Metodologías ágiles para el desarrollo de software", *Letelier & Penadés*, 2010.
- [26] P. Letelier y M. C. Penadés, "Metodologías ágiles para el desarrollo de software: eXtreme Programming (XP)", *Técnica Administrativa*, vol. 5, pp. 1-14, 2003.
- [27] Tiago Silva da Silva, "User-Centered Design and Agile Methods: A Systematic Review", de *in 2011 Agile Conference*, Salt Lake City, UT, 2011, pp. 77-86..

- [28] C. M. B, L. Alan y G.-H. Deborah, "User Centered Design (UCD) Process Description", SSC Pacific, San Diego, CA 92152-5001, 2014.
- [29] Alan Dix and Janet Finaly, "Chapter 9 Evaluation techniques", de *Human-Computer Interaction*, Edinburgh, PEARSON Prentice Hall, 2004, pp. 318-364.
- [30] J. Calvillo, L. Roa-Romero, M. Estudillo-Valderrama, M. Salgueira-Lazo, N. Aresté, N. del-Castillo-Rodríguez, F. González-Cabrera, S. Marrero-Robayna, V. López-de-la-Manzana y I. Román, "User-centred design for developing e-Health system for renal patients at home (AppNephro)", *International Journal of Medical Informatics*. 125. 10.1016/j.ijmedinf.2019.02.007., 2019.
- [31] L. Kopf y J. Huh-Yoo, "A User-Centered Design Approach to Developing a Voice Monitoring System for Disorder Prevention", *Journal of Voice*. 10.1016/j.jvoice.2020.10.015, 2020.
- [32] W. Wetzlinger, A. Auinger y M. Dörflinger, "Comparing Effectiveness, Efficiency, Ease of Use, Usability and User Experience When Using Tablets and Laptops", de *Design, User Experience, and Usability. Theories, Methods, and Tools for Designing the User Experience*, Springer International Publishing, 2014, pp. 402-412.
- [33] A. M. Sam McLellan, "The Effect of Experience on System Usability Scale Ratings", *Jurnal Of Usability Studies*, vol. 7, pp. 56-67, Febrero 2012.
- [34] S. Kakkar, "Implementation Aspects of Software Development Projects", *Annual IEEE India Conference, New Delhi*, pp. 1-6, 2006.
- [35] W. Harwin, J. Patton y V. Edgerton, "Challenges and Opportunities or Robot-Mediated Neurorehabilitation", *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, nº 9, pp. 1717 - 1726, September 2006.
- [36] Takehito Kikuchi, "Quasi-3-DOF Rehabilitation System for Upper Limbs:Its Force-Feedback Mechanism and Software for Rehabilitation", *IEEE*, 2007.
- [37] J. Iqbal, N. Tsagarakis, A. Fiorilla y D. Caldwell, "A Portable Rehabilitation Device for the Hand", *IEEE*, 2010.
- [38] A. Chiri y F. Giovacchini., "HANDEXOS: towards an exoskeleton device for the rehabilitation of the hand", *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1106-1111, Octubre 2009.
- [39] A. Chkeir, R. Jaber, D. Hewson y J. Duchêne, Reliability and validity of the Grip-Ball dynamometer for gripstrength, San Diego, California USA: Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2012.
- [40] Y. Y. Huang, Clinical-Based Engineering Assessment and Data Interpretation of Hand Strength for Task-Oriented Robotic Rehabilitation, 2011.
- [41] H.-S. Wang, C. Hsu, D. Chiu y S. Tsai, "Using augmented reality gaming system to enhance hand rehabilitation", *2010 2nd International Conference on Education Technology and Computer*, vol. 3, nº 2, pp. 234-246, 2010.

- [42] R. Ambar, H. Mhd Poad, A. Mohd Ali, M. Ahmad y M. M. Abdul Jamil, "Multisensor arm rehabilitation monitoring device", *10.1109/ICoBE*, pp. 27-28, 2012.
- [43] H. J. Hislop, J. Montgomery y B. H. Connolly, "Daniels and worthingham's muscle testing.", *Madrid: Marban*, p. 434, 2002.
- [44] P. Bhardwaj, S. Nayak, A. Kiswar y R. Sabapathy, "Effect of static wrist position on grip strength", *Indian journal of plastic surgery : official publication of the Association of Plastic Surgeons of India*, vol. 44, nº 1, pp. 55-58, 2011.
- [45] A. Sadun, J. Jalani y J. Sukor, "Force Sensing Resistor (FSR): a brief overview and the low-cost sensor for active compliance control", *1001112. 10.1117/12.2242950*, , 2016.
- [46] J. Villegas, "Diseño Mecatronico de un robot exoesqueleto de mano enfocado a rehabilitacion motriz superior", *Instituto Tecnológico de Orizaba*, p. 114, 2012.
- [47] P. aria-Alexandra, S. Jean-Michel y K. Maher, "Hall Effect Sensors Design, Integration and Behavior Analysis", *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 2, pp. 85-97, 2013.
- [48] D. Placko, "Force and deformation sensors", de *fundamentals of instrumentation and measurement*, Newport Beach, CA 92663, ISTE USA, 2007, pp. 109-110.
- [49] M. Pedro M., G. Enrique, B. Joan y B. Pedro, "Herramientas Manuales y Patologías", de *Ergonomía 3: Diseño de Puestos de Trabajo*, Mexico, Alfaomega, 2004, p. 270.
- [50] J. Radcliffe, B. Ga, H. Tan, B. Eberman, M. Srinivasan y B. Cheng, "Human factors for the design of force-Reflecting haptic interfaces", *Proc. ASME WAM*. 55., 1996.
- [51] T. Mcdowell, B. Wimer, D. Welcome, C. Warren y R. Dong, "Effects of handle size and shape on measured grip strength", *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 42, p. 199–205, 2012.
- [52] J. V. Juan Manuel y S. G. Oscar Osvaldo, Tesis de Maestría en Ingeniería Electrónica: Diseño mecatrónico de un robot exoesqueleto de mano, Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz., 2012.
- [53] R. Ambar, H. Mhd Poad, A. Mohd Ali, M. Ahmad y M. M. Abdul Jamil, "A study on the human grip force distribution on the cylindrical handle by intelligent force glove(I-force glove)", *2008 International Conference on Control, Automation and Systems*, p. 966–969, 2008.
- [54] J. Brooke, "SUS: A quick and dirty usability scale", *Redhatch Consulting Ltd*, p. 8, 1996.
- [55] ISO, "ISO 9241-11:2018 Ergonomics of human-system interaction", Online Browsing Platform (OBP), 2 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:en>. [Último acceso: 05 11 2020].